

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

LARISSA COUTINHO ROSA

**SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE ALUMINA NO CENTRO DE
LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA**

Vitória

2017

LARISSA COUTINHO ROSA

**SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE ALUMINA NO CENTRO DE
LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE
ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração em Poluição do Ar.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Davidson Martins
Moreira.

Vitória
2017

DEDICATÓRIA

Ao meu marido Magnun Taufner de Araújo.

Aos meus pais Fernando Cesar Garcia Rosa e Maria Beatriz Coutinho Rosa, e ao meu irmão Caio Cesar Coutinho Rosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao bom Deus, por ter me iluminado e dado forças nos momentos em que mais precisei.

Ao meu marido e aos meus pais que sempre me apoiaram e incentivaram, e não me deixaram desistir.

Ao meu orientador Professor Dr. Davidson Martins Moreira, agradeço pela confiança em mim depositada logo que comecei meus primeiros passos neste mestrado, e até os dias de hoje. E por ter me contemplado com uma bolsa de estudos pelo programa Pró-estratégia da Capes.

Aos professores da Pós-graduação em Engenharia Ambiental, que me apresentaram e me ensinaram à Engenharia Ambiental e a qualidade do ar.

Aos meus colegas de laboratório que me ajudaram imensamente no decorrer do mestrado, Rizzieri Pedruzzi, William Andreão, Igor Batista, Cássia Gobetti e Erick Speradio.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho.

E por fim, agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo e ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi simular a dispersão do material particulado Óxido de Alumínio durante e após o lançamento de foguetes no Centro de Lançamentos de Alcântara, no Estado do Maranhão. Foi utilizado para tal o modelo meteorológico de mesoescala, WRF, e o modelo simulador de efluentes de foguetes, MSDEF. Os dados meteorológicos da região obtidos através do WRF serviram como parâmetros de entrada para o modelo MSDEF.

A fim de analisar os resultados obtidos pelo WRF, foram coletados dados de radiossondagem entre os períodos seco e chuvoso do ano de 2013. E para o mesmo período foi feita a simulação dos dados através do software WRF. As análises são contempladas dos dias 18 a 21 do mês de março (período chuvoso) e pelos mesmos dias para setembro (período seco). Posteriormente, os parâmetros obtidos pela modelagem meteorológica foram utilizados como input para simular a dispersão do óxido de alumínio.

Pode-se afirmar que o objetivo principal e os objetivos específicos deste trabalho foram alcançados com sucesso, mostrando que é possível utilizar o modelo meteorológico de mesoescala, WRF para gerar dados de entrada ao MSDEF. É importante ressaltar que este sistema de modelagem pode ser aplicado a qualquer caso de lançamento de foguete em qualquer local do mundo, para simulações e análises pré e pós-lançamento dos efeitos ambientais de operações de lançamento de foguetes.

Palavras-chave: MSDEF, WRF, modelagem da dispersão de poluentes, nuvem de exaustão de foguete, poluição do ar, óxido de alumínio.

ABSTRACT

The main objective of this work was to simulate the dispersion of the aluminum oxide particulate material during and after the launching of rockets at the Alcantara launch center in the state of Maranhão. It was used the mesoscale meteorological model, WRF, and the rocket effluent simulator model, MSDEF. The meteorological data of the region obtained through the WRF served as input parameters for the MSDEF model.

In order to analyze the results obtained by the WRF, radiosonde data were collected between the dry and rainy periods of the year 2013. For the same period, the data were simulated using the WRF software. The analyzes are contemplated from days 18 to 21 of the month of March (rainy season) and by the same days for September (dry period). Subsequently, the parameters obtained by the meteorological modeling were used as input to simulate the dispersion of the aluminum oxide.

It can be affirmed that the main objective and the specific objectives of this work were successfully achieved, showing that it is possible to use the mesoscale meteorological model, WRF to generate input data to the MSDEF. It is important to note that this modeling system can be applied to any rocket launch case anywhere in the world for simulations and pre and post-launch analyzes of the environmental effects of rocket launch operations.

Keywords: MSDEF, WRF, pollutant dispersion modeling, rocket exhaust cloud, air pollution, aluminum oxide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estratificação da troposfera influenciada pela superfície terrestre, adaptado da apresentação do prof. André Becker Nunes, XVIII Semana Acadêmica da Meteorologia.	17
Figura 2. Estrutura da Camada Limite Planetária ao longo do dia, adaptado de Stull, 1988.	18
Figura 3. Tipos de pluma de acordo com a estabilidade atmosférica, adaptado de Arya, 1999.	20
Figura 4. Processo fisiológico de deposição pulmonar para material particulado.....	23
Figura 5. Fluxograma dos componentes do modelo WRF. Adaptado de SKAMAROCK et al.(2008).	25
Figura 6. Fluxograma dos componentes do pré-processador WPS e como é dado o passo inicial para a simulação com o ARW. Adaptado de SKAMAROCK et al.(2008).....	26
Figura 7. Interface gráfica para entrada dos dados de simulação.	32
Figura 8: Desenho esquemático de um motor de foguete a propulsão sólida, adaptado Canell, 2007.	34
Figura 9. Localização do Centro de Lançamento de Alcântara.	36
Figura 10. Localização dos domínios utilizados na modelagem WRF-LES, onde cada quadrado representa um domínio.	38
Figura 11. Comparação do comportamento de dados de modelagem WRF-LES com dados de radiossondagem para os parâmetros velocidade do vento, direção do vento, pressão e temperatura, dos dias 18 a 21 de março.....	42
Figura 12. Comparação do comportamento de dados de modelagem WRF-LES com dados de radiossondagem para os parâmetros velocidade do vento, direção do vento, pressão e temperatura, dos dias 18 a 21 de setembro.....	43
Figura 13. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 18/03.....	45
Figura 14. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 18/03.....	45
Figura 15. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 18/03.....	46
Figura 16. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 19/03.....	46

Figura 17. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 19/03.....	47
Figura 18. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 19/03.....	47
Figura 19. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 20/03.....	48
Figura 20. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 21/03.....	48
Figura 21. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 21/03.....	49
Figura 22. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 21/03.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de benchmark propostos por (EMERY et al. 2001).	40
Tabela 2. Avaliação do desempenho estatístico para a simulação do WRF.	41
Tabela 3. Informações meteorológicas de cada cenário de modelagem.	44

LISTA ABREVEATURAS E SIGLAS

CLP	Camada Limite Planetária
CLN	Camada Limite Noturna
WRF	Weather Research and Forecasting Mode
MSDEF	Modelo Simulador De Efluentes de Foguetes
CSA	Camada Superficial Atmosférica
AL	Atmosfera Livre
CLE	Camada Limite Estável
CLC	Camada Limite Convectiva
CLN	Camada Limite Noturna
CR	Camada Residual
USEPA	United States Environmental Protection Agency
MP	Material Particulado
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
SEAMA	Secretária de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
VLS	Veículo Lançador de Satélite
CLA	Centro de Lançamentos de Alcântara
REEDM	Rocket Exhaust Effluent Diffusion Model
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
MMM	Mesoscale and Microscale Meteorology
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
FAA	Federal Aviation Administration
MET	<i>Model Evaluation Tools</i>
VAPOR	<i>Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers</i>

GrADS

Grid Analysis and Display System

SÚMARIO

1	Introdução.....	14
2	Objetivos.....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivo Específico	16
3	Contextualização	17
3.1	Camada Limite Planetária.....	17
3.2	Estabilidade Atmosférica	19
3.3	Material Particulado	21
3.3.1	Impacto a saúde	22
3.3.2	Padrões de Qualidade do Ar.....	23
3.4	O Modelo WRF.....	24
3.4.1	Simulação de Grandes Turbilhões (LES) acoplado ao WRF.....	27
3.5	Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes - MSDEF	27
3.5.1	Parâmetros da Dispersão e de Turbulência	29
3.5.2	Formulação do MSDEF	29
3.5.3	O programa MSDEF	32
3.6	Motor Foguete	33
4	Metodologia	36
4.1	Região de Estudo	36
4.2	Metodologia Observacional	37
4.3	Modelagem Meteorológica.....	37
4.3.1	Avaliação de desempenho da modelagem meteorológica	38
5	Resultados e Discussão	41
5.1	Meteorologia.....	41

5.2	Simulação da Dispersão do Óxido de Alumínio	43
6	Conclusão.....	51
7	Referências	52

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar tem se tornado uma preocupação crescente e constante nas últimas décadas devido à evolução das atividades antropogênicas, que necessitam cada vez mais de energia e consequentemente, de combustíveis, acarretando em transtornos não somente ao meio ambiente, como também a própria saúde humana. Esses percalços estão associados diretamente às emissões de poluentes no estado gasoso, líquido ou partículas sólidas.

No Brasil, elevados índices de partículas são emitidas à atmosfera pelos grandes centros urbanos e pelas queimadas, devido à existência de inúmeras atividades industriais, fontes urbanas e agrícolas que contribuem para o empobrecimento da qualidade do ar, mesmo possuindo uma grande variedade de equipamentos de proteção ambiental disponíveis.

Dentre os problemas de poluição atmosférica, um importante e singular, motivo de estudo deste trabalho, está relacionado com o lançamento de foguetes, uma vez que essa atividade ao ser executada libera compostos químicos capazes de alterar a qualidade do ar.

Durante o lançamento de foguetes, ocorre a queima do combustível, provocando a formação de uma grande pluma. Essa nuvem quente, contendo produtos flutuantes, gerados a partir das reações de queima do motor, encontra-se a princípio próximo ao nível do solo, mas posteriormente ela ascende até estar em equilíbrio com as condições de temperatura e pressão da atmosfera. Um dos principais poluentes presente nesta pluma é o material particulado. Dentre os compostos presentes neste material particulado, está o óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), que se encontra em quantidade significativa, uma vez que ele é utilizado como um dos componentes do combustível sólido no foguete.

O material particulado em suspensão é um dos mais importantes parâmetros em estudos de poluição atmosférica devido aos diversos impactos que ele causa à saúde humana e ao meio ambiente.

Alguns estudos assinalam a presença de alumínio (Al) em água potável e em alimentos como um dos agentes etiológicos de doenças mentais, havendo também a hipótese de que a exposição a esse elemento represente risco para o desenvolvimento da doença de Alzheimer (FERREIRA, 2008).

O problema da poluição atmosférica tem despertado grande interesse na comunidade científica e vem sendo estudado com bastante afinco. Ele está diretamente relacionado com a dispersão de poluentes, que por sua vez, tem relação direta com as condições meteorológicas e as características topográficas de cada região.

É possível compreender o transporte de poluentes na Camada Limite Planetária (CLP), realizando uma série de observações de parâmetros que influenciam diretamente a capacidade dispersiva da atmosfera. Mas isto exige uma série de experimentos, equipamentos e profissionais especializados; o que acaba elevando os custos das observações e medições. Além disso, a utilização de observações experimentais não permite uma completa previsão de futuros impactos ambientais, tais como os oriundos da implantação de novas fontes emissoras. De modo a resolver este impasse, pesquisadores desenvolveram ferramentas para estimar a concentração de poluentes simulando

matematicamente o seu comportamento na atmosfera, de forma que seus resultados pudessem ser utilizados tanto por agências reguladoras do meio ambiente quanto em pesquisas acadêmicas.

Os modelos de qualidade do ar foram desenvolvidos para o uso em investigações científicas e também para fornecer suporte técnico às políticas de gerenciamento da qualidade do ar. Estes modelos estão cada vez mais complexos, porém seus resultados dependem da precisão e acurácia de uma extensa gama de parâmetros externos e internos (SEAMAN, 1999).

Nos últimos anos vários pesquisadores (GILLIAN *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.*, 2006; SRINIVAS *et al.*, 2006; CHANDRASEKEAR *et al.*, 2003) vêm realizando estudos que propõem o acoplamento de modelos de qualidade do ar à modelos tridimensionais que calculam os parâmetros meteorológicos tais como, campo de vento, pressão e temperatura entre outros fatores que são dados de entrada cruciais para os modelos de qualidade do ar (CHENG *et al.* 2008; KESARKAR *et al.*, 2006). A determinação do campo de vento bem como outros parâmetros meteorológicos têm diversos usos distintos, desde a validação de um modelo até a previsão do tempo (GILLIAN *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.* 2006; SRINIVAS *et al.*, 2006).

Existem vários modelos meteorológicos citados na literatura, que tem o potencial de fornecer informações detalhadas sobre a estrutura da camada limite planetária, entre eles o Weather Research and Forecasting (WRF). Atualmente, este é o modelo mais estudado, e vem sendo desenvolvido ano a ano com novas parametrizações. Ele corresponde ao estado da arte de modelos meteorológicos de mesoescala para simulações climáticas, previsões numéricas do tempo e em monitoramento da qualidade do ar.

Poucos são os modelos de qualidade de ar voltados para emissão de poluentes durante e posteriormente aos lançamentos de foguetes. O Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes (MSDEF), criado por (MOREIRA, 2010), tem por finalidade estimar os impactos ambientais no lançamento de foguetes. Ele calcula as concentrações de poluentes na atmosfera com base na emissão do veículo espacial, dados meteorológicos e de cenário do lançamento. Embora relativamente simples, baseando-se na física de dispersão atmosférica, o código é complexo, com um grande número de variáveis.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é simular a dispersão do material particulado óxido de alumínio em diferentes condições de estabilidade, para o Centro de Lançamentos em Alcântara (CLA), Maranhão, utilizando para tal os arquivos meteorológicos de saída do WRF como input para a modelagem do MSDEF.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A partir do contexto apresentado, esta dissertação de mestrado tem por objetivo simular a dispersão de alumina gerada após o lançamento de foguetes no centro de lançamento de Alcântara para três condições de estabilidade atmosférica.

2.2 Objetivo Específico

- Avaliar os dados meteorológicos obtidos pelo WRF;
- Estimar as concentrações de alumina próximo ao solo;
- Mensurar o raio de dispersão de alumina;
- Estimar a concentração de alumina para atmosferas instável, neutra e estável.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 Camada Limite Planetária

De acordo com (GARRATT, 1999), a camada limite planetária é a camada de ar diretamente influenciada pela superfície terrestre, onde os efeitos da superfície (atrito, aquecimento e resfriamento) são sentidos diretamente em uma escala de tempo menor que um dia, e onde os fluxos significativos de momentum, calor e matéria são transportados pela turbulência.

Já (STULL, 1998) afirma que a camada limite planetária pode ser definida como a parte da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre e responde as forças superficiais com escala temporal de uma hora ou menos. Essas forças incluem o atrito, a evaporação, emissão de poluentes entre outros em uma escala de altura que varia de centenas de metros a vários quilômetros. A Figura 1 representa esquematicamente a região da camada limite planetária.



Figura 1. Estratificação da troposfera influenciada pela superfície terrestre, adaptado da apresentação do prof. André Becker Nunes, XVIII Semana Acadêmica da Meteorologia.

O conhecimento da Camada Limite Planetária (CLP) é de fundamental importância para o entendimento dos processos na baixa troposfera e mais especificamente, para os fenômenos ligados à dispersão de poluentes atmosféricos, pois é nesta região onde se localizam a maior parte das fontes emissoras de gases e material particulado, sejam elas naturais ou antropogênicas (SANTIAGO, 2009).

A origem da CLP está ligada aos processos turbulentos e radiativos que tem relação direta com a troca de energia entre a superfície terrestre e a baixa atmosfera. Dentre os quais se destacam o aquecimento devido à energia solar, a absorção dessa energia pelo solo, a transpiração das plantas e ventos locais. A CLP também é influenciada pela topografia e pela rugosidade do terreno (ocupação do solo e cobertura vegetal). Estas condições impõem o ajustamento de variáveis como velocidade e direção do vento, temperatura e umidade aos contornos da superfície que consequentemente determinam o processo de transporte vertical na CLP (SANTIAGO, 2009). As características e o tempo de evolução da CLP são regidos pela turbulência. E muita dessa turbulência é gerada a partir de forças presentes na superfície (térmica, atrito e obstáculo).

De acordo com a Figura 2, a CLP apresenta um ciclo diurno e outro noturno conforme sua evolução ao decorrer do dia, onde são percebidas quatro grandes estratificações

principais: camada limite convectiva, camada estável noturna, camada residual e a camada superficial. A camada turbulenta diurna ou Camada Limite Convectiva (CLC), é onde estão presentes todas as escalas de vórtices, sendo que as maiores escalas começam a aparecer com a incidência dos primeiros raios solares que promovem o aquecimento da superfície. A camada estável noturna é formada próxima ao solo devido ao esfriamento da superfície da terra. Já a camada residual é formada imediatamente acima da camada noturna, onde, devido ao fenômeno da cascata de energia, permanecem na atmosfera as menores escalas durante toda a noite, até o próximo ciclo que se inicia ao amanhecer. E por fim, tem-se a camada próxima ao solo (camada superficial), na qual o processo turbulento se inicia, devido às variações térmicas e à rugosidade superficial.

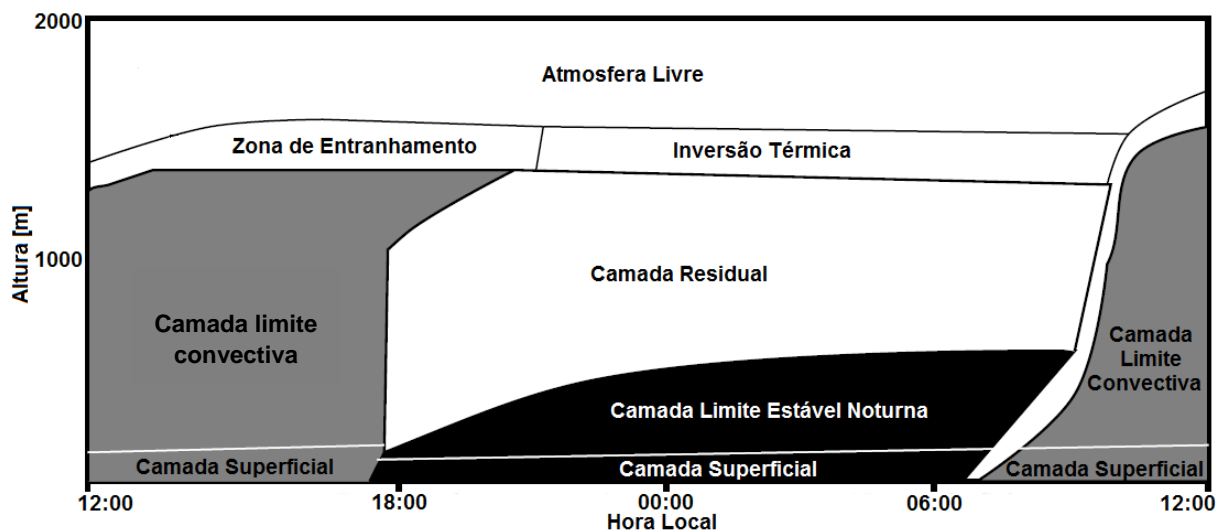


Figura 2. Estrutura da Camada Limite Planetária ao longo do dia, adaptado de Stull, 1988.

A evolução temporal da CLP tem seu início aproximadamente a partir das 6h e a medida que a superfície da Terra é aquecida ocorre um aumento na sua altura. Seus valores máximos são atingidos entre os períodos da manhã e da tarde. A camada de mistura é uma porção da atmosfera que vai da superfície da Terra até altura onde ocorre a inversão térmica. É caracterizada por uma forte mistura vertical impulsionada pelos fluxos de calor, umidade e de massa. Sua altura sofre uma grande variação diária e influencia diretamente a dispersão atmosférica, é depende notadamente da diferença entre a temperatura superficial e atmosférica.

De acordo com (SANTIAGO, 2009), uma das mais importantes características que influenciam o transporte de poluentes na atmosfera é a altura da CLP. A altura da CLP pode ser determinada através de várias maneiras: uso de radares (STRAWBRIDGE *et al.* 2004), radiossondagem ou com formulações disponíveis na literatura (STULL, 1998; ARYA 1999; TENNEKES, 1972). Com o incremento na tecnologia e no conhecimento, os novos modelos matemáticos tornaram-se ferramentas interessantes para o estudo da CLP em regiões distintas devido ao seu baixo custo em comparação às campanhas necessárias para tais observações. Os modelos matemáticos evoluíram no sentido de

acrescentar ao seu código algumas características específicas dos terrenos, por exemplo, no MM5 (GRELL *et al*, 1994) e no WRF (SKAMAROCK *et al* 2008) foi incorporado um sistema de referência que acompanha a topografia do terreno.

3.2 Estabilidade Atmosférica

A estabilidade atmosférica pode ser entendida como sendo a capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais. Ela é geralmente utilizada nos estudos de dispersão como parâmetro para definir o estado turbulento da atmosfera, ou para descrever a capacidade de dispersão de poluentes por difusão turbulenta vertical (MOHAN e SIDDIQUI, 1998).

Através do perfil vertical de temperatura potencial θ pode-se determinar o grau de estabilidade da atmosfera, e cada tipo de estabilidade atmosférica irá proporcionar uma melhor ou pior dispersão dos poluentes. A temperatura potencial pode ser definida como a temperatura que uma parcela de ar teria se fosse trazida adiabaticamente de um determinado nível até o nível onde a pressão é de 1000 Mbar. O conceito de temperatura potencial está intimamente relacionado com o conceito de estabilidade estática, ou seja, um arranjo do fluido em que a porção mais leve fica acima da porção mais pesada. Assim, de duas parcelas com θ diferentes, aquela com maior θ será a mais leve, (LEMES E MOURA, 1998).

Em geral, o movimento vertical de uma massa de ar é suficientemente rápido, podendo ser desprezada a troca de calor entre ela e a atmosfera circundante, isto é, o processo pode ser considerado adiabático. Portanto, se uma determinada parcela de ar é deslocada para cima em condições que podem ser consideradas adiabáticas, ela sofre uma expansão volumétrica e, conseqüentemente, sua temperatura diminui. Haverá equilíbrio térmico se o decréscimo da temperatura da parcela de ar que sobe adiabaticamente for igual ao decréscimo, com a altura, da temperatura do ar que a circunda. Nessas condições, a atmosfera encontra-se em equilíbrio neutro (ou estabilidade neutra) e a temperatura tem gradiente térmico vertical adiabático. Nessas circunstâncias, uma parcela de ar a qualquer altura não tende a subir nem a descer, onde a turbulência pode ser considerada homogênea. Porém, devido à troca de calor entre o sistema superfície-atmosfera e as influências das condições meteorológicas locais, raramente a atmosfera apresenta um perfil adiabático.

Se a temperatura do meio diminui mais rapidamente que o gradiente térmico vertical adiabático, uma parcela de ar que sobe adiabaticamente ficará mais quente e menos densa que o ar circundante e continuará a subir, amplificando os movimentos turbulentos, assim, a atmosfera está em equilíbrio instável e sua temperatura apresenta um gradiente térmico vertical superadiabático.

Ao contrário, se a temperatura do ar circundante diminui menos que o gradiente térmico vertical adiabático, ou mesmo aumenta com a altitude (inversão térmica), uma parcela de ar que sobe adiabaticamente ficará mais fria e mais densa que o ar circundante e tenderá a voltar a sua posição inicial, ocorrendo a supressão dos movimentos turbulentos. Nesse caso, a atmosfera encontra-se em equilíbrio estável. Sob essas condições, por não existir a

difusão turbulenta, a pluma é deslocada a grandes distâncias, mantendo as concentrações (SALVADOR, 2014).

A Figura 3 ilustra o comportamento da pluma de acordo com o tipo de estabilidade. Para condições instáveis ela se comporta de maneira serpenteante, no caso A. Para condições neutras o aspecto de uma pluma de poluentes assume a forma cônica, como apresentado no caso B. E em condições estáveis, o aspecto da pluma em uma atmosfera estável é tubular como mostrado no caso C.

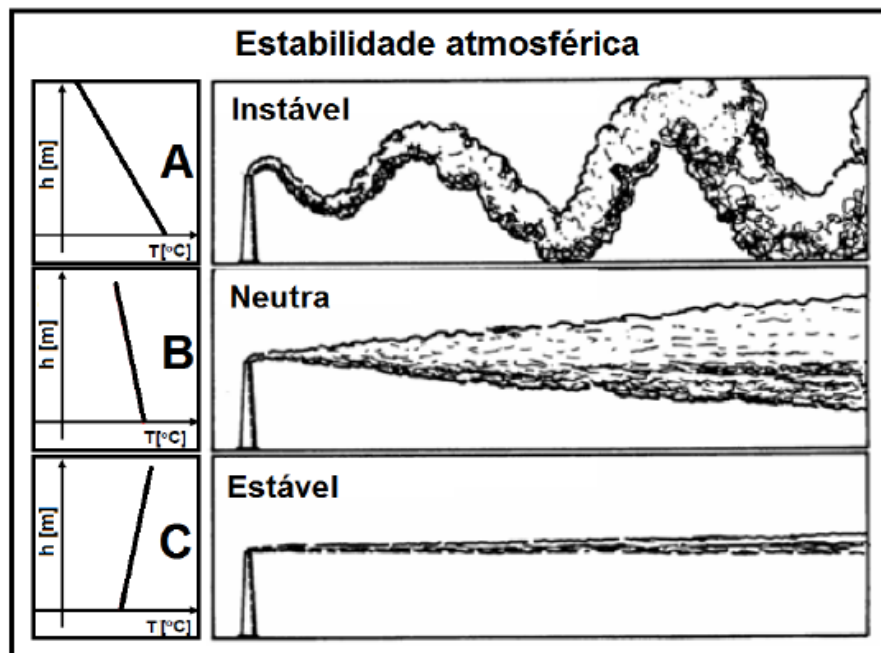


Figura 3. Tipos de pluma de acordo com a estabilidade atmosférica, adaptado de Arya, 1999.

Existem ainda situações mistas, onde o perfil de temperatura sofre uma inversão com a altura e a pluma pode ser, por exemplo, aprisionada nesta camada de inversão. É o caso da fumigação, onde uma inversão de altura impossibilita a dispersão para altitudes mais elevadas, enquanto que na camada abaixo o perfil é instável. Desta forma o poluente é disperso em direção ao solo pelas correntes descendentes os níveis de concentração ao nível do solo podem ser bem altos. Este tipo de condição ocorre geralmente pela manhã ou à noite. Outra situação bem próxima da fumigação é a chamada *trapping*. Neste caso a atmosfera encontra-se em estado neutro e logo acima, na altura da pluma, uma camada de inversão se forma. Assim os poluentes são aprisionados e se dispersam em formato cônico. O inverso deste caso é a chamada condição do tipo anti-fumegante, em que uma inversão localizada abaixo da altura da chaminé impede que os poluentes cheguem ao solo (MORAES, 2004).

3.3 Material Particulado

A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) define o material particulado como uma complexa mistura de partículas sólidas e líquidas (exceto água pura) encontradas no ar, com diferentes características químicas e físicas, emitidas por fontes poluidoras ou formadas na atmosfera através de reações químicas. Essas partículas se apresentam sob uma enorme gama de tamanhos. Algumas podem ser vistas a olho nu, outras somente com uso de microscópios.

Considerando a origem do poluente, o material particulado (MP) pode ser classificado de duas maneiras: poluente primário ou poluente secundário. MP primário é aquele que é emitido diretamente pela fonte, não participa de nenhuma reação na atmosfera, e se encontra com as mesmas características de como foi formado. MP secundário é aquele formado através de reações químicas na atmosfera envolvendo comumente Oxigênio Atmosférico (O_2), vapor de água (H_2O), Ozônio (O_3), Dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), radicais como hidroxila (OH^\cdot) e nitrato (NO_3^{2-}), e gases orgânicos (USEPA, 2004).

O material particulado é caracterizado pela distribuição de tamanho das partículas e composição química das mesmas (JACOBSON, 2002). Uma distribuição de tamanho pode ser explicada como uma variação da concentração (em número, área superficial, volume ou massa de partículas por unidade de volume de ar) com o tamanho das partículas. A composição química do material particulado apresenta uma grande variedade de substâncias devido, principalmente, às partículas finas que se associam com poluentes gasosos secundários (GODISH, 1997).

O tamanho de partícula pode variar de cerca de 500 a 5 nm, sendo que as menores partículas são apenas aglomerados moleculares e as partículas maiores são visíveis a olho nu ($>50\ \mu m$). As partículas pequenas ($<1\ \mu m$) se comportam como gás na atmosfera e estão sujeitas ao movimento browniano (movimento aleatório). Essas partículas seguem fluxos de fluidos em torno de obstáculos e são capazes de coagular, ou seja, podem se juntar umas às outras, tornando-se partículas maiores. As partículas maiores são mais características de matéria sólida, pois elas estão fortemente sujeitas à ação da gravidade e raramente sofrem coagulação (STRANGER, 2005).

As partículas são classificadas em geral pelas suas propriedades aerodinâmicas, uma vez que essas propriedades determinam os processos de transporte e remoção no ar, penetração e deposição no trato respiratório. O diâmetro das partículas na atmosfera, usualmente, varia de $0,002\ \mu m$ a maiores que $100\ \mu m$ (COLLS, 2002). Partículas menores que $2,5\ \mu m$ de diâmetro são geralmente chamadas de “finas” e aquelas maiores que $2,5\ \mu m$ de diâmetro como “grossas” (SEINFELD e PANDIS, 2006). As partículas grossas e finas, em geral, originam-se separadamente, são removidas da atmosfera por diferentes mecanismos, necessitam de diferentes técnicas de remoção nas fontes, têm diferentes composições químicas e propriedades óticas e também diferem significativamente nos padrões de deposição no trato respiratório.

As fontes de emissão de partículas na atmosfera podem ser naturais ou antropogênicas. A fração grossa pode ser originada por uma diversidade de fontes como partículas de

ressuspensão do solo, cinzas, fuligem, pólen, entre outros. Os principais elementos encontrados nessa fração são de origem mineral, como a sílica, o alumínio, ferro, potássio, cálcio, entre outros metais alcalinos. Em parcela menor pode-se encontrar carbonatos e compostos orgânicos (GODISH, 1997). A fração fina tem em sua composição concentrações significativas de íons como o sulfato, nitrato e amônio, carbono elementar, compostos orgânicos condensados e uma variedade de metais. Ambas as formas dos carbonos, elementar e orgânico, são comuns em partículas finas de ambiente urbanos e rurais. Carbono orgânico inclui hidrocarbonetos primários emitidos em combustões, vapores condensados associados com líquidos voláteis e produtos secundários produzidos por reações fotoquímicas. Os metais tais como cádmio, níquel, vanádio, zinco, cromo, ferro e mercúrio aparecem em maior magnitude em áreas urbanas que áreas rurais (GODISH, 1997).

3.3.1 Impacto a saúde

No cenário atual, a poluição atmosférica tem um peso significativo tanto nas doenças do trato respiratório como nas mortes prematuras. Segundo a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2006) mais de 2 milhões de pessoas morrem anualmente devido aos efeitos da poluição do ar.

O material particulado é o poluente atmosférico mais consistentemente associado a efeitos adversos à saúde humana (WHO, 2006). Estudos recentes mostram que os efeitos adversos da poluição do ar, principalmente em relação ao material particulado, acontecem mesmo para baixas concentrações dos poluentes. A toxicidade do material particulado está fortemente relacionada ao tamanho e composição química das partículas.

As partículas inaladas são transportadas juntamente com o ar através das vias respiratórias e com isso, as consequências da inalação desse material particulado dependem da sua capacidade de penetrar no trato respiratório, da sua concentração em massa, da composição química, do seu tamanho, da forma, da densidade e da sua capacidade de absorver água (higroscopicidade) (PILCER e AMIGHI, 2010).

As partículas maiores do que 30 μm de diâmetro aerodinâmico têm uma baixa probabilidade de entrar nas passagens nasais. Essas partículas maiores, comumente poeira, são geralmente retidas no nariz e na garganta causando pequenas irritações e são geralmente expelidas nas trocas gasosas das vias superiores com o ar externo (STRANGER, POTGIETER-VERMAAK e VAN GRIEKEN, 2008). A Associação Americana do Pulmão indica que as partículas em suspensão no ar com diâmetro menor que 10 μm (MP_{10}), as chamadas *partículas inaláveis*, são as mais nocivas à saúde humana. As partículas de MP_{10} são pequenas o suficiente para serem inaladas, e podem ficar alojadas na traquéia e nos brônquios. Já as partículas com diâmetro igual ou inferior a 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$), podem causar as mais profundas crises pulmonares, onde se tem complicações com os alvéolos, uma vez que essas partículas podem ficar retidas no tecido pulmonar por anos, levando à bronquite crônica, enfisema e até às doenças cardíacas. Algumas das menores partículas, aquelas com diâmetro de aproximadamente 0,1 μm , as chamadas de ultrafinas, são pequenas o bastante para se transferir pelo sangue e chegar aos alvéolos (NEMMAR *et al.*, 2002; AVIGO JR., 2008).

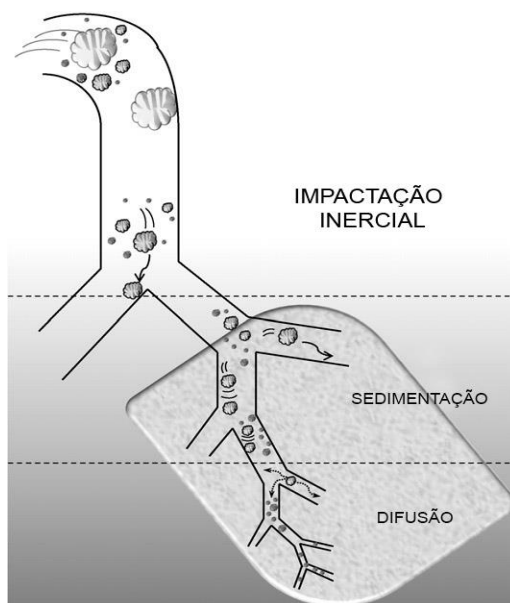


Figura 4. Processo fisiológico de deposição pulmonar para material particulado.

A Figura 4 sintetiza os processos de deposição pulmonar, sinalizando os diferentes mecanismos em relação ao tamanho das partículas. As partículas com maior diâmetro sofrem um mecanismo de impactação, onde não consegue seguir o trato respiratório devido às diversas curvas e, por consequência, colidem com as mucosas das vias aéreas superiores. Assim, essas partículas se aderem a essas mucosas, sendo expelidas pelos movimentos do próprio sistema respiratório (COHS, 2012; STRANGER, 2005). Aproximadamente 95% dessas partículas, as quais têm um diâmetro maior que 5 μm , são filtradas no nariz (AVIGO JR., 2008). As partículas entre 1 μm e 5 μm sofrem um processo chamado de sedimentação, o qual ocorre nas vias aéreas inferiores, chegando aos bronquíolos terminais e respiratórios. Por fim, as partículas menores que 1 μm estão sujeitas à deposição por difusão, este processo é um movimento aleatório das partículas, como resultado do seu bombeamento de gás, fazendo com que a deposição ocorra nas vias aéreas inferiores, chegando aos alvéolos (STRANGER, 2005; ALVES, 2009; CCOHS, 2012).

3.3.2 Padrões de Qualidade do Ar

Segundo (CETESB, 1998), um padrão de qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do bem estar das pessoas. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada.

No Brasil, o monitoramento da poluição atmosférica e o controle da qualidade do ar são previstos por legislação, a qual prevê o estabelecimento de padrões está voltada para os principais poluentes atmosféricos, adotados universalmente como indicadores da qualidade do ar (dióxido de enxofre, partículas em suspensão, monóxido de carbono, oxidantes fotoquímicos expressos como ozônio, hidrocarbonetos e dióxido de nitrogênio).

A legislação federal, através da Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), de nº 03 de junho de 1990, estabeleceu dois tipos de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários.

São padrões primários de qualidade do ar concentrações de poluentes que, ultrapassados, poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curtos e médio prazo.

E são padrões secundário de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo dos quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano a fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiental em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentrações de poluentes constituindo-se uma meta a longo prazo.

Em (CETESB, 1998) é proposto uma subdivisão do poluente material particulado, considerando duas classes de partículas: as partículas totais em suspensão (PTS), referindo-se às partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 50 μm ; e as partículas inaláveis, que são aquelas com diâmetro aerodinâmico menor que 10 μm .

Ainda de acordo com a Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90, são estabelecidos padrões nacionais de qualidade do ar específicos para o material particulado em suspensão, tanto para períodos curtos de exposição (média de 24 horas) como para períodos longos (médias anuais).

O estado do Espírito Santo, através da Secretária de Estado do Meio Ambiente e Recurso Hídricos (SEAMA), também estabeleceu padrões de qualidade do ar por intermédio do Decreto nº 3463-R de dezembro de 2013, onde cabe ao Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEMA) a execução de metas que visem ao atendimento aos padrões de qualidade do ar, considerando o respeito aos limites máximos de emissão e exigências complementares.

3.4 O Modelo WRF

O WRF (Weather Research and Forecast) constitui-se num sistema de modelagem numérica da atmosfera de última geração, desenvolvido para a previsão do tempo e estudos de fenômenos atmosféricos de micro e mesoescala. O seu desenvolvimento é resultado da colaboração entre centros de pesquisa e agências governamentais dos EUA como National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), US Department of Defense, Oklahoma University, Federal Aviation Administration (FAA).

Pesquisadores de todo mundo podem e contribuem para o desenvolvimento do programa, uma vez que ele é de domínio público e disponibilizado gratuitamente. O WRF é utilizado em diversas aplicações que incluem previsões numéricas do tempo (operacionais ou não) voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, aplicações na previsão da qualidade do ar, acoplamento com modelos de previsões oceânicas e de dispersão de poluentes atmosféricos e simulações idealizadas.

O sistema WRF comporta dois núcleos (ou cores) dinâmicos que diferem entre si quanto à formulação das equações dinâmicas, às variáveis de prognóstico usadas, ao modo como são dispostas as variáveis na malha e ao método de integração temporal. São eles: o ARW (Advanced Research WRF) e o NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Possui ainda diferentes módulos como: real, idealizado (WRF-LES), químico (WRF-Chem), para pesquisa de furacões, clima e para acoplamento de outros modelos, foco deste trabalho. As simulações são realizadas em quatro dimensões (x, y, z, t), pois a cada passo de tempo a malha horizontal repete-se em todos os níveis verticais.

O WRF caracteriza-se como um modelo totalmente compressível e não hidrostático (com uma opção de simulação hidrostática), apresentando coordenada de pressão hidrostática do tipo terrain-following, em termos de coordenada vertical. Sua grade é do tipo Arakawa C, uma das estruturas mais eficientes computacionalmente e conveniente para a representação de fenômenos atmosféricos em amplo espectro de escalas. O modelo utiliza esquema de integrações no tempo Runge-Kutta de segunda e terceira ordem, além de esquemas de advecção de segunda e sexta ordem, tanto na horizontal como na vertical. A versão 3 do WRF suporta uma variedade de capacidades, entre elas: simulações de dados reais e simulações idealizadas; diversas opções de condições de fronteiras laterais para simulações reais e idealizadas; opções físicas completas e diversas opções de filtros; análise de nudging tridimensional; nudging observacional; aplicações regionais e globais.

É possível perceber, observando a Figura 5, as formas de assimilação dos dados de entrada para o modelo, os tipos de pré-processadores, os núcleos de processamento (a escolha destes núcleos depende do tipo de simulação desejada) bem como os programas de pós-processamento dos dados (geração de imagens).

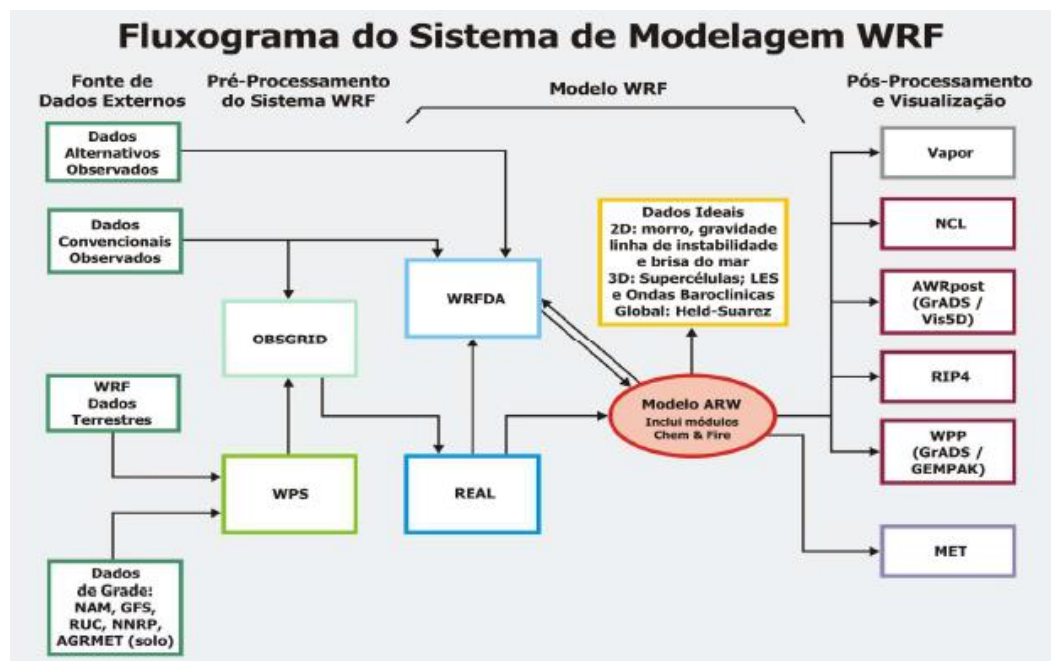


Figura 5. Fluxograma dos componentes do modelo WRF. Adaptado de SKAMAROCK et al. (2008).

A estrutura deste sistema de modelagem integra alguns módulos principais, como mostrado na Figura 6, que consiste de: um pré-processamento realizado em um pacote de programas separados denominado WPS (WRF Preprocessing System), cuja saída é passada para o

processamento principal (ARW Solver), primeiramente pelo programa “real” e, em seguida, para o WRF em si. A saída final do WRF pode ser pós-processada para um formato amigável a programas de visualização gráfica suportada pelos programas Grid Analysis and Display System (GrADS), Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers (VAPOR), Model Evaluation Tools (MET), além de outros.

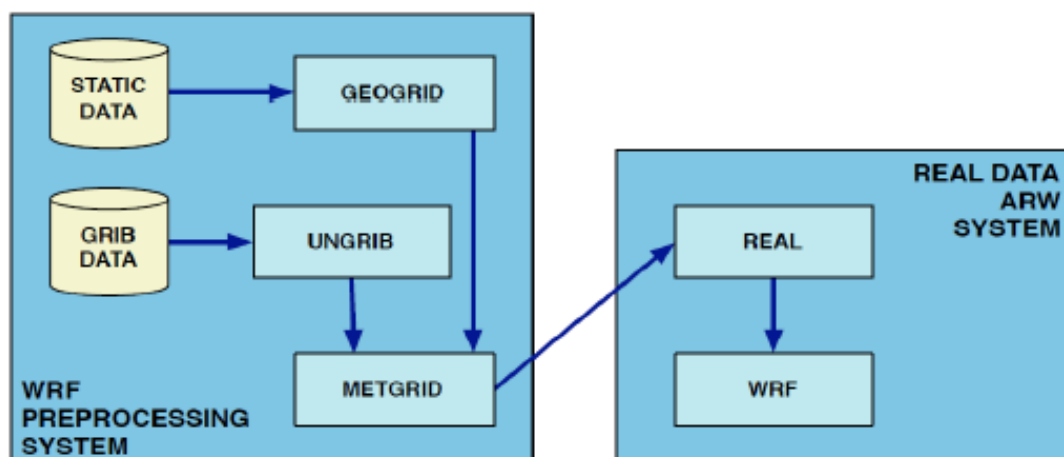


Figura 6. Fluxograma dos componentes do pré-processador WPS e como é dado o passo inicial para a simulação com o ARW. Adaptado de SKAMAROCK et al.(2008).

O WPS recebe os dados terrestres e meteorológicos (normalmente no formato GriB) e os transforma em dados de entrada para o núcleo de processamento ARW. Neste primeiro passo, o WPS define a malha física, onde é incluído o tipo de projeção cartográfica, localização no globo, número de pontos da malha, localização das sub-malhas e distância entre os pontos da malha. Após isso, é realizada a interpolação dos campos estáticos para o domínio prescrito. O arquivo de saída gerado pelo WPS contém a completa caracterização da atmosfera para a malha desejada e para o dia de início da simulação. O GEOGRID é responsável por criar o domínio do modelo e gerar os arquivos estatísticos dos dados terrestres. O UNGRIB é responsável por decodificar os dados meteorológicos de iniciação do modelo que podem estar no formato GriB1 ou GriB2. Por fim, o METGRID é o programa responsável por interpolar os dados gerados pelo UNGRIB, para todo o domínio criado pelo programa GEOGRID. Esta etapa é o ponto inicial para que o núcleo de processamento ARW dê início à simulação.

O processamento propriamente dito fica a encargo dos sistemas Real e WRF, sendo que o *Real* gera as condições iniciais e de fronteira, definidas para os quatro lados de uma grade retangular; realiza a interpolação vertical a partir dos dados de entrada do WPS, que contém informações de pressão e define o conjunto das opções físicas.

E o formato WRF realiza a integração das equações de Euler não hidrostáticas e compressíveis da dinâmica atmosférica em cada ponto de grade e em cada nível vertical, a partir dos arquivos de fronteira fornecidos pelo *real*. Incluem-se as equações básicas da dinâmica e da termodinâmica que governam o escoamento atmosférico, sejam elas as equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e a equação do estado.

Conforme observou (SOARES DA SILVA, 2012), o código do *WRF* é aberto e o mesmo foi desenvolvido para ser flexível, portátil e eficiente em ambientes de computação paralela. Neste sentido, o *WRF* oferece uma diversidade de parametrizações físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados em conjunto com o modelo. Além disso, pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros, incluindo-se ainda previsões numéricas do tempo operacionais e voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, modelos dirigidos de qualidade do ar, acoplamento oceano-atmosfera e simulações idealizadas.

No manual proposto por (SKAMAROCK et al. 2008), é possível encontrar uma descrição mais detalhada a respeito do modelo *WRF*.

3.4.1 Simulação de Grandes Turbilhões (LES) acoplado ao *WRF*

Os grandes turbilhões são responsáveis pelo transporte de momentum e contaminantes. Um modelo do tipo LES resolve numericamente as equações de movimento para os maiores turbilhões e parametriza para as menores escalas, as quais têm comportamento laminar. O *WRF* também possui para casos reais, em suas versões mais recentes, esse módulo capaz de realizar simulações LES, adequado para simulações de altíssima resolução espacial.

Em particular, os turbilhões em análise neste trabalho, são provocados especificamente durante o lançamento de foguetes, onde grandes e quentes nuvens são formadas em decorrência da queima de combustíveis.

3.5 Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes - MSDEF

A ferramenta para análise da dispersão tóxica, e para suporte de lançamentos de foguetes e avaliação de risco público, de domínio brasileiro é o Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes (MSDEF), criado por (MOREIRA, 2010).

Esse modelo foi criado para atender as características dos lançamentos e da meteorologia brasileira, mas adotando como referencia física e matematica o modelo REEDM, utilizado pelos Estados Unidos.

A queima de combustível, durante os primeiros segundos antes e imediatamente após o lançamento do veículo, resulta na formação de uma grande nuvem de produtos aquecidos próximo ao solo com subsequente ascensão na atmosfera até a temperatura e a densidade da nuvem alcançarem um equilíbrio aproximado com as condições ambientes, essa nuvem, por convenção, foi chamada de “ground-cloud”. O foguete também libera material efluente a partir de lançamentos normais que vão através de toda a profundidade da troposfera e mais além.

O código MSDEF é designado para calcular concentrações de pico (máximas), com deposição seca e úmida (resultante de ação da gravidade e remoção por precipitação devido à chuva), incluindo reações químicas de primeira ordem, para lançamentos normais e abortados/testes/explosão para uso em:

- planejamento de atividades de missões e avaliação ambiental;
- previsões pré-lançamentos dos efeitos ambientais de operações de lançamento;
- análise ambiental pós-lançamento.

Para análise de dispersão atmosférica da emissão de foguetes que podem afetar receptores sobre o solo, tem sido prática padrão nos EUA (“Cape Canaveral” e “Vandenberg Air Force Base”) simular emissões do lançamento de um veículo a partir do solo até aproximadamente 3000 m.

A ferramenta para análise da dispersão tóxica nos EUA e, para suporte de lançamentos e avaliação de risco público, é a versão 7.13 do modelo REEDM (“Rocket Exhaust Effluent Diffusion Model”) (BJORKLUND et al., 1982; BJORKLUND, 1990; BJORKLUND et al., 1998).

O REEDM foi utilizado como referência na modelagem física e matemática do problema em questão na elaboração do código do programa MSDEF. Por este motivo, eles apresentam abordagens similares em alguns aspectos.

Uma hipótese que o modelo REEDM faz, sobre a natureza e o comportamento da nuvem liberada pelo foguete, é que ela pode ser inicialmente definida como uma única nuvem que cresce e se move, mas permanece como uma única nuvem durante a formação da fase de ascensão da mesma. Este conceito é ilustrado na Figura 2, e pode ser notado que o modelo REEDM é designado para obter concentrações na direção do vento preferencial a partir da posição na nuvem estabilizada.

A segunda hipótese está relacionada com o sistema de multicamadas. O aspecto “multicamada” do modelo REEDM atualmente ainda é usado e se relaciona com o particionamento da nuvem estabilizada em “discos” de material da nuvem representados por diferentes níveis meteorológicos em diferentes altitudes. O modelo relaciona a formação inicial da nuvem na forma esférica para lançamentos normais e na forma cilíndrica para lançamentos abortados/testes/explosões. Uma vez que a nuvem está definida e tem atingido a condição de estabilidade térmica com a atmosfera, a nuvem é particionada em “discos”. O posicionamento de cada disco com relação à origem (plataforma de lançamento) é determinado baseado no tempo de ascensão da nuvem através de uma sequência de camadas meteorológicas que são definidas usando níveis de medida obtida através de uma radiossonda. Cada camada meteorológica pode ter uma única velocidade e direção de vento que desloca o disco da nuvem na direção do mesmo.

A hipótese de transporte em linha reta usada no modelo REEDM durante o transporte da nuvem e fase de dispersão ignora a possibilidade de campos de vento complexos que podem surgir em terrenos montanhosos ou que possam evoluir durante a passagem de uma brisa do mar ou frente de maior escala. Desta forma, é recomendado que a hipótese de ventos uniformes seja limitada ao transporte da pluma em distâncias não superiores a 25 km. Neste sentido, o modelo REEDM faz previsão de concentração que vai de 5 a 10 km a partir da plataforma de lançamento, de forma que esta hipótese não é um problema.

O modelo REEDM também assume que todas as reações químicas de combustão são completadas antes do processo de ascensão da nuvem. Uma fração de massa é atribuída a cada constituinte e a massa total da fonte (nuvem) é multiplicada por esta fração para determinar a massa total de cada componente químico na nuvem. O peso molecular de cada espécie é usado para converter a concentração de massa por unidade de volume (mg/m^3) para parte por milhão (ppm).

O modelo MSDEF utiliza os mesmos aspectos físicos usados no modelo REEDM, porém com diferenças nas camadas meteorológicas, com a condição de continuidade de fluxo e concentração (perfis verticais mais reais), diferentes parametrizações da turbulência (coeficientes de difusão e parâmetros de dispersão), considerando o atual conhecimento da física da CLA. Cabe ressaltar que os parâmetros de escala fundamentais, tais como: a altura da camada limite atmosférica (h), a velocidade convectiva (w_*), a velocidade de atrito (u_*), perfis verticais do vento ($u(z)$), comprimento de Monin-Obukhov (L) e demais parâmetros importantes na determinação destas escalas de comprimento e velocidade, são todos obtidos a partir de dados de radiossondagem. However, in this work these parameters are derived from WRF mesoscale model.

3.5.1 Parâmetros da Dispersão e de Turbulência

A determinação da altura de estabilização da “ground-cloud” para lançamentos normais e da pluma gerada para falhas de lançamento é um importante fator no cálculo de concentração, pois, em geral, a concentração máxima calculada na superfície da Terra é inversamente proporcional ao cubo da altura de estabilização. No caso de lançamentos normais de veículos com combustível sólido, o tempo de “hold-down” e o tempo de residência na primeira centena de metros são relativamente curtos. A “ground-cloud” é, portanto, comprimida pelo gás aquecido emitido em um período da ordem de dez segundos. Experiências nos dados coletados pela NASA mostram a ascensão da “ground-cloud” nestas circunstâncias é calculada de forma mais adequada usando um modelo “cloud-rise” instantâneo. Porém, para o caso de lançamento abortado ou com explosão a melhor opção é o modelo contínuo (“plume-rise”).

3.5.2 Formulação do MSDEF

Físico e matematicamente, o modelo MSDEF é baseado na teoria K de dispersão turbulenta. A teoria K é largamente utilizada em muitas condições atmosféricas porque descreve o transporte difusivo de forma Euleriana onde quase todas as medidas são Eulerianas, produzindo resultados que concordam com dados experimentais tão bem quanto qualquer modelo mais complexo, e não exige computacionalmente tanto quanto os modelos de ordem superior necessitam.

Um problema típico com a equação de difusão turbulenta é a busca de soluções correspondentes a fontes de poluição instantâneas e contínuas. Neste item é apresentado um método geral para resolver a equação de difusão turbulenta usando a transformada de Laplace considerando-se a CLA como um sistema multicamadas. Este método permite utilizar valores contínuos de coeficientes de difusão e vento fisicamente mais reais.

Por conveniência, as fórmulas de concentração estão escritas em um sistema de coordenadas retangulares com a origem no ponto de estabilização da nuvem. O eixo x é direcionado na direção ao longo da direção do vento médio u, e o eixo y está direcionado na direção perpendicular ao vento médio. No programa, a origem do sistema de coordenadas está colocada na plataforma de lançamento.

A equação de difusão-advecção pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = -\frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} + S \quad (1)$$

Onde C representa a concentração média, K_x , K_y , K_z e u , v , w são as componentes Cartesianas do coeficiente de difusão de velocidade do vento, respectivamente, e S é o termo fonte. Os termos $\overline{u'c'}$, $\overline{v'c'}$ e $\overline{w'c'}$ representam os fluxos turbulentos de poluentes na direção longitudinal, lateral e vertical, respectivamente.

O modelo matemático mais utilizado preocupa-se em solucionar o problema de fechamento da Equação 2 baseando-se na hipótese de transporte por gradiente que, em analogia com a difusão molecular, assume que a turbulência é proporcional à magnitude do gradiente de concentração média:

$$\overline{u'c'} = -K_x \frac{\partial C}{\partial x} ; \quad \overline{v'c'} = -K_y \frac{\partial C}{\partial y} ; \quad \overline{w'c'} = -K_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

Neste sentido, considerando-se um sistema Cartesiano de coordenadas em que a direção x coincide com a do vento médio, a equação de difusão-advecção transiente pode ser escrita como (BLACKADAR, 1997):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

A integração lateral (direção y) da Equação 4 conduz à seguinte equação:

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \overline{C}}{\partial x} + w \frac{\partial \overline{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \overline{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \overline{C}}{\partial z} \right) + S \quad (4)$$

Onde,

$$\overline{C} = \int_{L_y} C(x, y, z, t) dy \quad (5)$$

É a concentração integrada lateralmente. Esta hipótese é aceitável, pois a dispersão lateral pode ser assumida Gaussiana, a qual resultará na seguinte equação:

$$C(x, y, z, t) = \bar{C}(x, z, t) \frac{e^{(-y^2 / 2\sigma_y^2)}}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \quad (6)$$

O modelo para simulação da dispersão de foguetes deve levar em conta as seguintes situações: deposição seca e úmida e reações químicas de primeira ordem. Para isto, a equação resultante a ser resolvida é:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - v_g \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) - \lambda \bar{C} - \Lambda \bar{C} \quad (7)$$

Onde v_g é a velocidade de queda das partículas devido a gravidade, λ representa reações químicas de primeira ordem (decaimento) e Λ representa o coeficiente de remoção devido a precipitação.

Para a solução da Equação 8 se deve ter em mente as condições iniciais e de contorno. Assume-se que inicialmente a região de dispersão não está poluída, ou seja:

$$\bar{C}(x, z, 0) = 0 \quad \text{em } t = 0 \quad (8)$$

E no ponto $(0, H_s, t)$ existe uma fonte contínua com taxa de emissão constante Q :

$$\bar{C}(0, z, t) = \frac{Q}{u} [\eta(t) - \eta(t - t_r)] \delta(z - H_s) \quad \text{em } x = 0 \quad (9)$$

Onde $\delta(z - H_s)$ é a função delta de Dirac, H_s é a altura da fonte, η é a função de Heaviside e t_r é o tempo de liberação (BIANCONI e TAMPONI, 1993).

Assumem-se condições de contorno de fluxo nulo de poluentes no topo da CLA:

$$K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = h \quad (10)$$

E uma condição não nula na superfície:

$$K_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = V_d \bar{C} \quad \text{em } z = 0 \quad (11)$$

Onde h é a altura da CLA e $V_d (m/s)$ é a velocidade de deposição seca.

A transformada de Laplace é uma técnica bem conhecida para resolver equações diferenciais lineares e uma literatura vasta é encontrada sobre este assunto. Esta metodologia é aplicada para resolver a Equação 7 de modo a construir soluções analíticas para a equação de difusão-advecção e que permitirá realizar simulações numéricas da dispersão de poluentes liberado por foguetes na CLA. Para atingir este objetivo, a Equação 7 é transformada em um conjunto de equações diferenciais ordinárias pela aplicação da transformada de Laplace. Após resolver estas equações com procedimento padrão, a concentração de poluentes é obtida realizando-se a inversão da concentração transformada pelo esquema numérico de quadratura Gaussiana. Existe vasta literatura sobre este método de solução (MOREIRA, 1999, 2004a, 2006).

3.5.3 O programa MSDEF

A Figura 7 é um diagrama esquemático mostrando os componentes do programa. Requisitos meteorológicos de entrada para o programa são obtidos a partir dos perfis verticais de direção do vento, velocidade do vento, temperatura, pressão atmosférica entre a superfície até 3000 m (similar ao código REEDM da NASA). Estas informações podem ser obtidas durante as atividades de suporte ao lançamento com medidas de radiossondagem ou através de software de simulação meteorológica, como realizado neste trabalho.

Título do Programa

Versão de testes. Você ainda pode utilizar o programa 7920 vezes

Principal | Entrada de Dados | Gráfico 3D | Gráfico 2D

Lançamento

☒ Normal ☐ Abortado

Dados do Foguete

Taxa de Emissão (kg/s) ✖

Quantidade de Calor Liberado (cal/g) ✖

Poluente

☒ CO2 ☐ HCl

☐ CO ☐ Al2O3

Velocidade Terminal (m/s) ✔

Precipitação (mm/h)

☒ Sem Chuva ☐ Moderada

☐ Leve ☐ Chuva Pesada

Reação Química/decaimento (h) ✔

Deposição:

☒ Sem Deposição ☐ Com Deposição

Cobertura de Nuvens **Parcial**

Grade X

Distância Final (m) ✔

Distância Inicial (m) ✔

Delta X (m) ✔

Grade Y

Grade eixo Y (m) ✔

Delta Y (m) ✔

Tempo de Média na Concentração

☒ 10min ☐ 60min

Albedo ✔

Razão de Bowen (H/LE) ✔

Data de Lançamento: Ano Mês Dia

Hora de Lançamento: Hora Minuto Segundo

Executar

Figura 7. Interface gráfica para entrada dos dados de simulação.

O programa é controlado pelo operador com dados de entrada introduzidos através de uma interface. Uma vez que o operador tenha escolhido as opções de lançamento, o programa automaticamente seleciona um conjunto de dados para uso nos algoritmos desenvolvidos para calcular os seguintes parâmetros:

- parâmetros micrometeorológicos (altura da camada limite atmosférica, velocidade convectiva, velocidade de atrito, comprimento de Monin-Obukhov) e de turbulência (coeficiente de difusão e parâmetro de dispersão lateral);
- posição no espaço da “ground-cloud” ascendente e tempo de estabilização da nuvem;
- dimensões da nuvem como uma função da altura;
- distribuição dos produtos efluentes dentro da nuvem como uma função da altura;

Após o programa executar os cálculos de concentração, o resultado poderá ser visualizado através de uma interface gráfica, com resolução em x (direção longitudinal e do vento médio u) e y (direção transversal) escolhidos previamente pelo operador. Se a concentração escolhida for com tempo de média 10 min, o arquivo de saída incluirá a concentração de pico instantânea e a média em 10 min, com as respectivas distâncias onde ocorrem estes máximos, incluindo a direção preferencial do vento. Por outro lado, se a concentração escolhida for com tempo de média 60 min, o arquivo de saída incluirá a concentração de pico instantânea e a média em 60 min, com as respectivas distâncias onde ocorrem estes máximos, incluindo a direção preferencial do vento. Todos os resultados de concentração obtidos pelo modelo são ao nível do solo. Como mencionado anteriormente, o operador tem a possibilidade da visualização gráfica, com gráficos da concentração instantânea e média (10 min ou 60 min) em função da distância x e também gráfico de isolinhas. Além disso, no arquivo de saída (relatório.dat) são mostrados todos os parâmetros micrometeorológicos, parâmetros do gás ou partícula (deposição, remoção) e do foguete utilizados na simulação.

3.6 Motor Foguete

Propulsão, no seu sentido mais amplo, é a ação de induzir uma massa a movimentar-se. No caso da propulsão a jato, a força imposta ao corpo é gerada pela ejeção de massa (valendo-se da terceira Lei de Newton – Ação e Reação). Restringindo o conceito ao âmbito da tecnologia de foguetes clássica, trata-se de qualquer veículo com propulsão a jato no qual a massa ejetada, que recebe o nome de propelente, está armazenada no próprio veículo (HUMBLE *et al.*, 1995).

Existem diversos meios de conseguir a energia para a propulsão, dentre os mais utilizados estão: energia solar, elétrica, nuclear e química e outras menos usuais. O trabalho em questão é situado no campo da propulsão química (HUMBLE *et al.*, 1995).

Em foguetes com propulsão química a energia é proveniente de uma reação química em uma câmara de combustão para produzir gás com alta pressão e elevada temperatura (2500 a 4100°C) na entrada do bocal convergente/divergente. Estes gases são expandidos no bocal, e este processo converte uma parte da energia térmica liberada na reação química

em energia cinética associada a uma alta velocidade (1800 à 4300 m/s) do jato de exaustão dos gases (SUTTON & BIBLARZ, 2001 e POLYAEV & BURKALTSEV, 2002).

Foguetes com propulsão química podem ser classificados de acordo com o estado físico do propelente. Estes sistemas são: sólido, líquido e híbrido (SUTTON & BIBLARZ, 2001).

Um motor-foguete movido a propelente sólido é constituído basicamente de um tubo metálico cilíndrico, denominado envelope motor, preenchido quase totalmente com massa propelente, o grão propelente. A Figura 8 apresenta este tipo de motor-foguete.

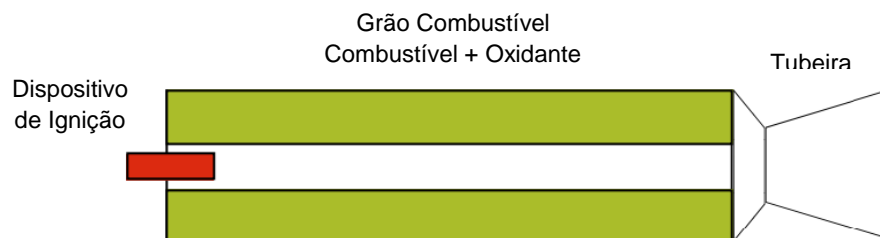


Figura 8: Desenho esquemático de um motor de foguete a propulsão sólida, adaptado Canell, 2007.

Propelente sólido é uma mistura complexa e estável de compostos redutores e oxidantes que, quando ignizados, queimam de uma maneira homogênea, contínua e controlada, formando a altas temperaturas moléculas gasosas de baixa massa molecular. Desta forma, ocorre na câmara do motor-foguete, um formidável aumento de espécies gasosas com grande elevação de temperatura e pressão no sistema. Na saída do motor-foguete existe um estreitamento, chamado garganta de exaustão ou tubeira, por onde os gases resultantes da queima saem acelerados. O aumento de pressão, que pode atingir em certos casos 100 Mpa, resulta no impulsionamento do foguete.

Os propelentes sólidos, do tipo compósito, são constituídos de três componentes principais: Uma porção orgânica, rica em carbono e hidrogênio, conhecida como binder, que serve como ligante e gerador de gases; um sal inorgânico oxidante, rico em oxigênio, e um auxiliar balístico, normalmente um metal, tendo os sólidos uma micro granulometria bem definida.

Os auxiliares balísticos são introduzidos na formulação com a finalidade de aumentar as propriedades energéticas do propelente. Regra geral, são elementos metálicos. O metal mais comumente utilizado é o alumínio em pó com forma esférica. Outros metais como magnésio e zircônio podem ser utilizados, porém, normalmente com resultados inferiores ao alumínio.

Os principais constituintes do propelente são o perclorato de amônio, alumínio em pó e resina. Estes três constituintes correspondem aproximadamente a 95% da massa do propelente. Os outros 5% são aditivos, englobando um plastificante, agente de ligação, antioxidante, catalisador de cura, agente de cura, anti catalisador de cura e agente de processamento, sendo o plastificante cerca de 60% da massa dos aditivos.

Como já foi mencionado, as reações que ocorrem são do tipo oxirredução, onde o sal perclorato de amônio é o agente oxidante e os outros componentes funcionam como agentes redutores. Praticamente toda energia fornecida provém da reação do perclorato de amônio com o alumínio em pó e a resina hidroxilada. Tanto o perclorato como o alumínio devem ser finamente divididos aumentando suas áreas específicas e assim, melhorando a superfície de contato.

4 METODOLOGIA

O trabalho proposto será realizado em duas etapas, sendo a primeira delas a modelagem dos dados meteorológicos para a região de Alcântara por intermédio do modelo WRF. A segunda será a utilização do software MSDEF, acoplado aos dados micrometeorológicos gerados pelo WRF, para simular a dispersão da alumina em diferentes alturas da atmosfera.

4.1 Região de Estudo

O Centro de Lançamento de Alcântara está situado no litoral do estado do Maranhão, conforme Figura 9, tendo como coordenadas geográficas 2°24' S; 44°24' W, a 32 km da capital, São Luiz, e com altitude entre 40 e 50 m. Onde são realizados os lançamentos de cargas úteis (satélites e/ou experimentos científicos) brasileiros, por meio do veículo lançador de satélites (VLS) e/ou foguetes de sondagem, tal como o VSB-30.

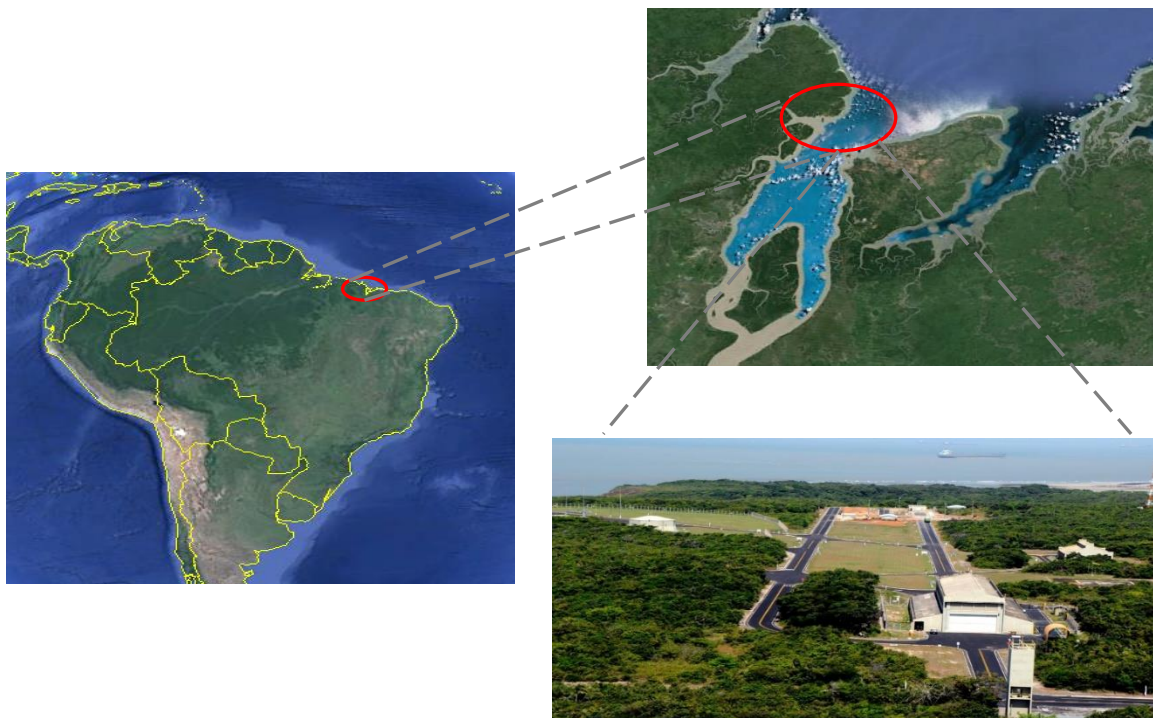


Figura 9. Localização do Centro de Lançamento de Alcântara.

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) possui uma localização privilegiada para a construção de um centro de lançamentos de foguetes devido à proximidade com a linha do Equador (latitude de 2°S), faixa na qual o gasto de energia é bastante reduzido para colocação de satélites em órbita geoestacionária, possibilitando grande economia de combustível (SILVA, 2014).

Em relação ao vento, o conhecimento de sua estrutura vertical (perfis médios e rajadas de vento) é importante, pois os foguetes são projetados e construídos para suportarem uma determinada carga pela ação do vento, além do fato de que a trajetória, controle e guiagem dos mesmos são determinados pelo perfil de vento próximo à superfície (FISCH, 1999).

O CLA apresenta características típicas, pois possui uma região de rugosidade abrupta: superfície lisa próxima à superfície rugosa. Além disso, nesta descontinuidade, ocorre uma relativa variação topográfica (falésias do mar), com desnível em torno de 50m. Próxima a esta região de transição abrupta (litoral), encontra-se a rampa de lançamento de foguetes, a qual sofre fortemente a influência destes dois fatores. Esta rampa situa-se cerca de 50m da costa, em uma altitude de 42 m. Neste caso, os foguetes colocados na rampa sofrem a influência de forte turbulência, devido a influência do perfil de vento. O vento, inicialmente em equilíbrio com sua superfície oceânica, interage com a vegetação arbustiva (altura média das árvores de 3 (três) metros), modificando-se. Aumentando a complexidade desta situação, ocorre o deslocamento vertical da superfície, devido às falésias. São estas situações que os foguetes encontrarão, ao ascenderem verticalmente. (FISCH, 2002).

Ainda se acordo com (FISCH, 2002), o clima dessa região é complexo, devido à proximidade com a linha equatorial, sofrendo direta influência da mesma.

O clima de Alcântara apresenta um regime de precipitação dividido em dois períodos: chuvas intensas durante os meses de janeiro a junho, sendo os meses de março e abril os mais chuvosos, com total mensal superior a 300 mm; e período seco de julho a dezembro, com precipitação inferior a 15 mm por mês (FISCH, 1999). Os ventos possuem um comportamento bem distinto entre as épocas chuvosas e secas, além da influencia da brisa marítima sobre o local. A temperatura do ar e a umidade relativa não apresentam variações sazonais e seus valores são típicos da atmosfera tropical, com valores médios mensais de temperatura entre 26,7° C (março) e 28,1° C (novembro) e a umidade relativa entre 77% (março e abril) e 89% (outubro e novembro).

4.2 Metodologia Observacional

No CLA encontra-se uma torre metálica de 70 m de altura equipada com sensores de velocidade tipo hélice (“propeller”) e direção do vento tipo “aerovane” da R.M Young (Traverse City, EUA). Estes sensores estão instalados em seis níveis, nas alturas de 6,0 m (nível n=1), 10,0 m (n=2), 16,3 m (n=3), 28,5 m (n=4), 43,0 m (n=5) e 70,0 m (n=6). A direção predominante do vento na TA nos níveis mais baixos é de NE (aproximadamente 45 graus), pois é uma superposição dos ventos alísios com a circulação de brisa marítima.

4.3 Modelagem Meteorológica

O estudo de caso se refere a uma simulação de 4 dias, de 18 a 21 de Março de 2013, utilizando o modelo WRF versão 3.5 para geração de dados meteorológicos, com dados de GFS como entrada. Os domínios foram configurados com 5 domínios, com resolução horizontal de 8,1 km, 2,7 km, 900 m, 300 m e 100 m para os domínios de 1 a 5, respectivamente, com 70 níveis verticais. A Figura 10 apresenta a localização e distribuição dos domínios, sendo que o domínio 5, o mais fino, é tão pequeno em relação aos demais que sua localização está sinalizada apenas pelo número 5.



Figura 10. Localização dos domínios utilizados na modelagem WRF-LES, onde cada quadrado representa um domínio.

Um dos principais desafios que foram encontrados para a execução do modelo WRF em modo LES para casos reais foi a aquisição e configuração de um novo e completo conjunto de dados de relevo para a região do CLA com altíssima resolução, visto que, atualmente, a melhor resolução de relevo disponível no WRF é de 1 km (30" de grau), a qual não é adequada para simulações de grandes turbilhões. Destarte, a partir do sítio do órgão 106 americano de geofísica, o USGS, foram baixados dados de relevo em formato GeoTIFF na resolução de 3" de grau, aproximadamente 92,5 m, para a região de Alcântara. Então, esses dados foram processados, se tornando um novo conjunto de dados de relevo no formato de entrada do pré-processador de terreno do WRF, o programa geogrid, permitindo assim a modelagem no WRF com relevo de altíssima resolução.

4.3.1 Avaliação de desempenho da modelagem meteorológica

A avaliação de desempenho de modelos numéricos, como WRF, se dá pela comparação dos dados simulados com dados observados e essa comparação é feita por indicadores estatísticos que buscam mensurar se o modelo conseguiu representar satisfatoriamente os dados observados.

Existem metodologias para se avaliar os resultados, como a utilizada por (HANNA e PAINE, 1988), (CHANG e HANNA, 2005), (GILLIAM, HOGREFE e RAO, 2006) e (EMERY et al. 2001). Geralmente as metodologias empregam métricas que comparam os resultados simulados com observados. (EMERY et al. 2001) sugeriu métricas específicas para temperatura, velocidade e direção do vento e umidade específica do ar, sugerindo ainda valores de referência os conhecidos *benchmarks* para auxiliar na avaliação dos resultados.

Cada indicador estatístico mostra a relação entre dados observados e simulados, assim aplicaram-se os seguintes índices estatísticos:

- Viés médio (*Mean Bias* - MB): esse método avalia o comportamento dos valores simulados com observados, onde valores positivos significam que os dados simulados estão superestimados e valores negativos indicam que os dados

simulados estão subestimados, quando comparados com os dados observados. Para esse método aplica-se a Equação 12,

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varphi_{sim} - \varphi_{obs}) \quad (12)$$

- Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Gross Error* - MAGE): esse método é usado para calcular indicar a incerteza ou o erro médio associado entre os valores simulados e observados. Para essa técnica se aplica a Equação 13,

$$MAGE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varphi_{sim} - \varphi_{obs}| \quad (13)$$

- Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE): representa a raiz quadrada do erro médio quadrático, que é a média quadrática das diferenças entre os pares dos dados simulados com observados. Calculado pela Equação 14.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varphi_{sim} - \varphi_{obs})^2} \quad (14)$$

- Índice de concordância (*Index of Agreement* – IOA): serve como uma medida normalizada do grau de erro de previsão do modelo e varia entre 0 e 1. Um valor de 1 indica uma combinação perfeita e 0 indica que não há concordância entre os resultados simulados com observados. Calculado pela Equação 15,

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_{sim} - \varphi_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (|\varphi_{sim} - \bar{\varphi}_{obs}| + |\varphi_{obs} - \bar{\varphi}_{obs}|)^2} \right] \quad (15)$$

Sendo φ_{obs} os valores das variáveis observadas em estações de monitoramento da qualidade do ar e estações meteorológica e φ_{sim} os valores das variáveis simuladas e n o número de observações.

Os indicadores estatísticos e os valores de *benchmark* foram utilizados em diversos estudos como (USEPA, 2005), (BORGES et al. 2008), (ZHANG et al. 2014), (REBOREDO et al. 2015), entre outros, porém a própria USEPA no documento “*Modeling Guidance for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM_{2.5}, and Regional Haze*”, (USEPA, 2014) cita que esses valores de estatísticos não devem ser os únicos indicativos de sucesso da simulação e sim como indício que análises adicionais devem ser feitas.

Tabela 1. Valores de benchmark propostos por (EMERY et al. 2001).

Parâmetro Meteorológico	Estatística	Benchmark
Temperatura	MB (K)	$\leq \pm 0.50$
	MAGE (K)	≤ 2.00
	IOA	≥ 0.80
Velocidade Vento	MB (m.s^{-1})	$\leq \pm 0.50$
	RMSE (m.s^{-1})	≤ 2.00
Direção Vento	MB ($^{\circ}$)	$\leq \pm 10.00$
	MAGE ($^{\circ}$)	≤ 30.00

Para a validação dos dados de saída do modelo WRF foram expostos e utilizados apenas aqueles índices estatísticos pertinentes ao trabalho em questão, ou seja, aqueles parâmetros utilizados na simulação dos dados meteorológicos. A Tabela 1 resume os parâmetros estatísticos utilizados para avaliação do desempenho de cada teste, segundo os índices estatísticos e *benchmarks* sugeridos por (EMERY et al. 2001).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Meteorologia

Os resultados obtidos através da simulação meteorológica para a região de Alcântara foram validados por intermédio dos índices estatísticos e de benchmark propostos por (EMERY et al. 2001), e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Avaliação do desempenho estatístico para a simulação do WRF.

Parâmetro	Estatística	Benchmark	18/03/2013	19/03/2013	20/03/2013	21/03/2013
Temperatura	MB (K)	$\leq \pm 0.50$	-3,29	-2,48	-2,11	-2,54
	MAGE (K)	≤ 2.00	3,29	3,56	3,65	3,11
	IOA	≥ 0.80	1,00	1,00	3,65	3,11
Velocidade Vento	MB (m.s ⁻¹)	$\leq \pm 0.50$	-1,39	-1,23	0,62	0,68
	RMSE (m.s-1)	≤ 2.00	2,74	2,86	2,34	2,41
Direção Vento	MB (°)	$\leq \pm 10.00$	2,98	1,89	-24,44	6,57
	MAGE (°)	≤ 30.00	23,59	31,87	44,04	47,11

Para os dias 18 e 19 houve extrapolação dos limites considerados para os parâmetros temperatura e velocidade do vento. No dia 19, ocorreu uma sutil extrapolação de MAGE para o parâmetro direção do vento. Com relação aos demais parâmetros apresentados, eles se mostram bem próximos aos limites estabelecidos.

Com base nos resultados apresentados, considerando o uso do modelo meteorológico WRF-LES modelo de grandes escalas, pode-se dizer que seu desempenho foi bom e promissor, uma vez que melhorou a precisão dos resultados, tornando os valores simulados muito próximos e por algumas vezes igual aos valores medidos no campo.

Posteriormente a validação dos dados de saída obtidos na modelagem WRF-LES, foi realizado um comparativo entre esses e os valores medidos em campo através do equipamento de Radiossondagem, para os períodos seco e chuvoso do ano de 2013. As análises são contempladas dos dias 18 a 21 do mês de março (período chuvoso) e pelos mesmos dias para setembro (o período seco), conforme descrito anteriormente. Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas as séries temporais de velocidade, direção, pressão e temperatura, respectivamente, aos períodos seco e chuvoso.

Ao observarmos o parâmetro direção do vento, fica claro que a predominância do vento é na direção Leste, com rotação para Nordeste no período seco e rotação para Sudeste no período chuvoso. Isso se deve a extensa faixa de mar aberto localizada na região, que provoca maior influência na mesma do que sua proximidade meridional. Estes resultados estão em concordância com o regime de ventos alísios durante a estação chuvosa e também com resultados de (FISCH, 1997; 1999), (GISLER, 2009) e (MARCIOTTO *et al.* 2012).

Na comparação entre as duas estações, é nítido que a velocidade é maior no período seco do que no período chuvoso, fato este já observado anteriormente (FISCH, 1999 e MAGNAGO *et al.*, 2010). São observados ventos máximos de 10 m/s entre 2000 a 3000 m em março e de 12 m/s a 1000 m e 14 m/s em 2500 m em setembro (dentro dos valores

típicos climatológicos de 10 a 15 m/s até 2000 m para a estação seca, segundo (FISCH, 1999). Segundo (MAGNAGO *et al.*, 2010), os ventos são tão intensos que acabam provocando a mistura turbulenta local e a geração de turbulência acaba sendo puramente mecânica.

Os perfis dos quatro horários sinóticos da estação seca mostram uma rotação da direção do vento para sudeste próximo de 2000 m, observada por (FISCH, 1997) e também grandes amplitudes de velocidade ao longo do eixo vertical.

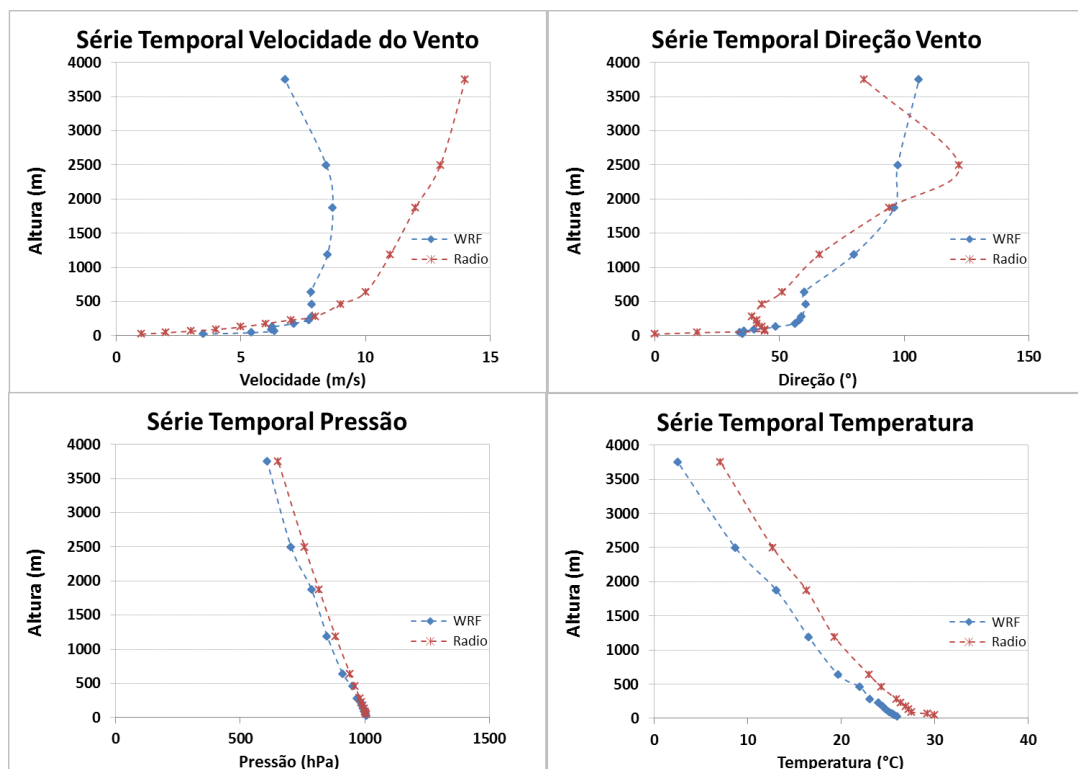


Figura 11. Comparação do comportamento de dados de modelagem WRF-LES com dados de radiossondagem para os parâmetros velocidade do vento, direção do vento, pressão e temperatura, dos dias 18 a 21 de março.

Conforme nota-se na figura, a temperatura apresentou variação de 300 a 303 graus Kelvin, sendo mais elevada na superfície terrestre do que no oceano, o que pode ser atribuído ao maior calor específico do solo. Observa-se ainda que a temperatura se manteve baixa e não sofreu alterações abruptas ao longo dos dias para o período do mês de março, sendo esta também uma característica da região, conforme discutido detalhadamente em (FISCH, 1997).

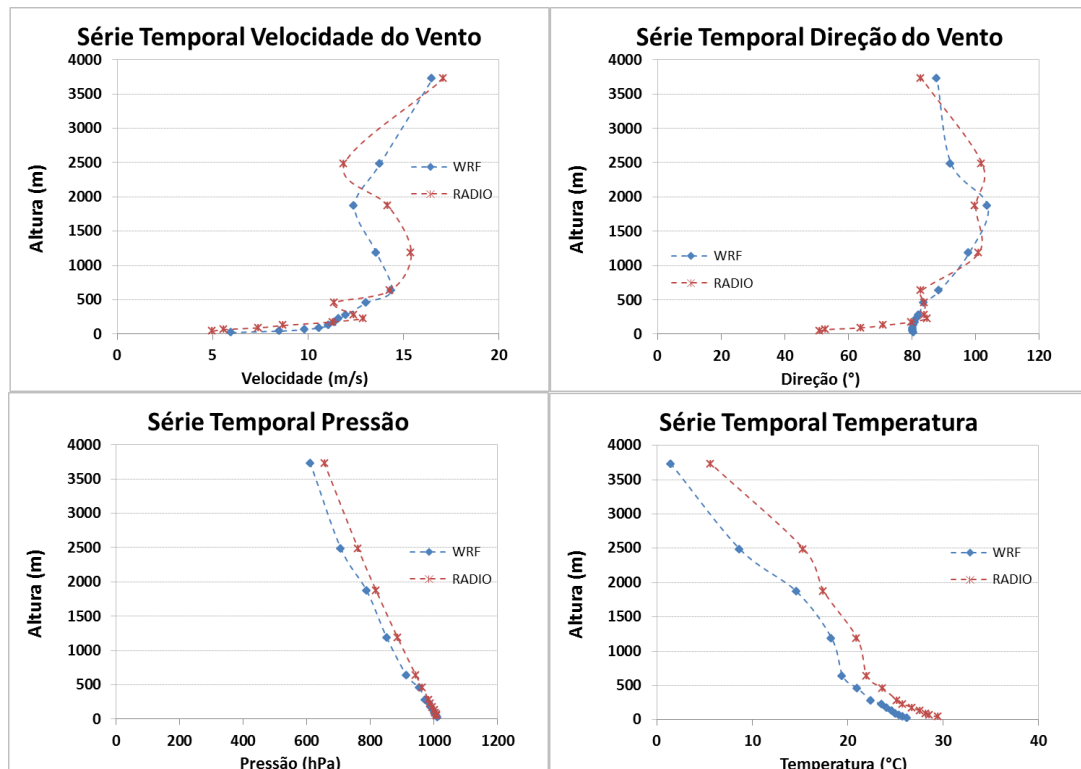


Figura 12. Comparação do comportamento de dados de modelagem WRF-LES com dados de radiossondagem para os parâmetros velocidade do vento, direção do vento, pressão e temperatura, dos dias 18 a 21 de setembro.

Observa-se que o modelo apresentou resultados cujo comportamento é bem próximo ao dos dados coletados pela radiossonda para todas as alturas, a exceção do parâmetro velocidade do vento no período chuvoso, exposto na Figura 11, onde a disparidade entre as medições e a simulação começa a ocorrer a partir dos 1000 m de altura. Para a direção do vento, também no período chuvoso, apenas dois pontos apresentam disparidade, ambos acima dos 2500 m de altura.

Para o período seco, conforme Figura 12, o modelo descreve bem todos os parâmetros em questão quando comparados com as medições de radiossondagem. Com destaque para os parâmetros de temperatura e pressão.

5.2 Simulação da Dispersão do Óxido de Alumínio

Nessa seção serão apresentados os resultados da simulação da dispersão do poluente óxido de alumínio proveniente do processo de combustão durante o lançamento de foguetes em situações normais, para análise de curto alcance.

Foram selecionados três cenários meteorológicos dentro do período modelado pelo WRF-LES que representassem as diferentes condições de estabilidade atmosférica, avaliando, para cada uma delas, o impacto de um lançamento hipotético de um foguete com as mesmas características do VLS (ver Tabela 3) em situação normal.

Assim, a Tabela 3, cujos dados foram obtidos do relatório de execução do MSDEF, apresenta as informações meteorológicas extraídas da modelagem com o WRF-LES, que caracterizaram cada cenário e sua respectiva condição de estabilidade atmosférica, onde o horário está expresso no horário de Greenwich, u^* representa a velocidade de fricção (m/s), L é o comprimento de Monin-Obukhov (m), w^* é a escala de velocidade convectiva vertical (m/s), h é a altura da camada limite atmosférica (m), e u_{v10} e u_{d10} são, respectivamente, a velocidade (m/s) e a direção ($^\circ$) do vento médio na camada de superfície (~10m), todos referentes à célula de grade (43,43) do domínio 3 (de resolução de 900m) onde se encontra o CLA. A configuração de domínios é a mesma apresentada anteriormente na Seção 4.3, tendo sido escolhido o domínio 3 para a execução das modelagens por ter o tamanho e a resolução suficientes para se avaliar o impacto do transporte químico de longo alcance da nuvem de exaustão nas vilas e cidades do entorno da região do CLA.

Tabela 3. Informações meteorológicas de cada cenário de modelagem.

Condição Atmosférica	Data e hora (GMT)	Data e hora local (GMT-3)	u^* (m/s)	L (m)	w^* (m/s)	h (m)	u_{v10} (m/s)	u_{d10} ($^\circ$)
Estável	18/03/2013 09:00h	18/03/2013 06:00h	0,4	100,0	0,0	874,8	3,5	74,0
Instável	18/03/2013 16:00h	18/03/2013 13:00h	0,6	-30,3	2,5	773,5	2,9	62,8
Neutra	18/03/2013 22:00h	18/03/2013 19:00h	0,6	180,0	0,0	733,0	4,0	63,6

Nas Figuras 13 a 22, são apresentados os cenários de concentração do poluente alumina em nível de superfície com intervalo de 10 minutos para os dias 18 a 21/03, modelado pelo MSDEF para o caso de lançamento normal e condição atmosférica instável. As concentrações são menores na região mais próxima à superfície, e vão aumentando a medida com alcançam níveis mais altos, onde há emissões em função das partições das nuvens.

Para os primeiros 30 minutos, a concentração de Al_2O_3 aumenta gradativamente com o tempo. Decorrido esse tempo, a concentração começa a cair, devido a dispersão desse poluente. Ainda pode se observar que a grande parte desse poluente encontra-se concentrado próximo a base de lançamento.

Nas primeiras camadas a concentração assume valores relativamente baixos, mas que aumentam nas camadas correspondentes às partições da nuvem de exaustão, alcançando seu valor máximo nas partições com maior volume (e consequentemente com maior emissão).

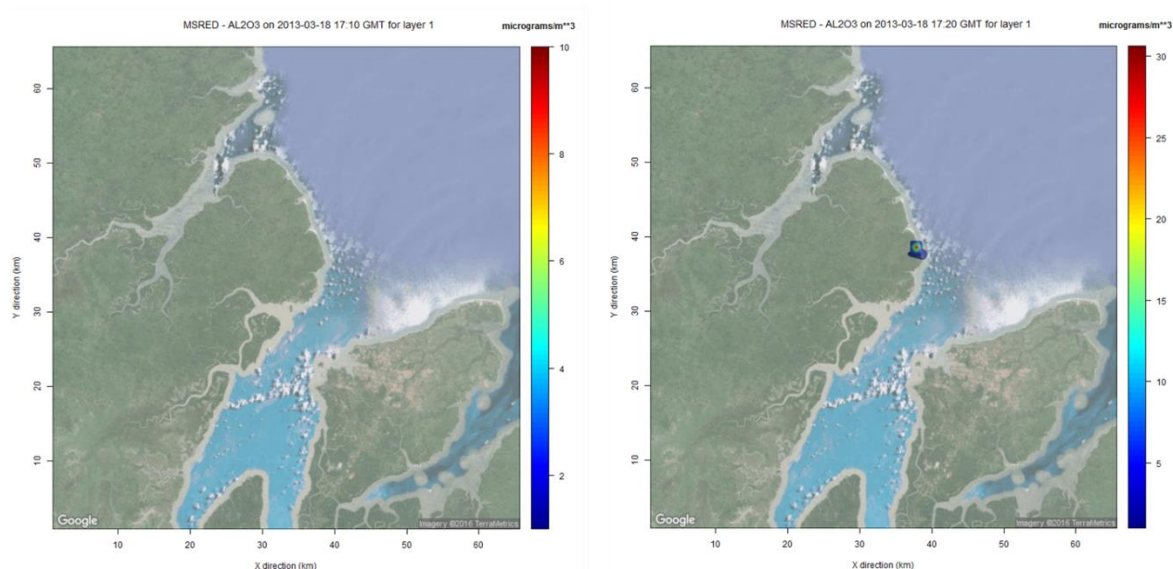


Figura 13. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 18/03.

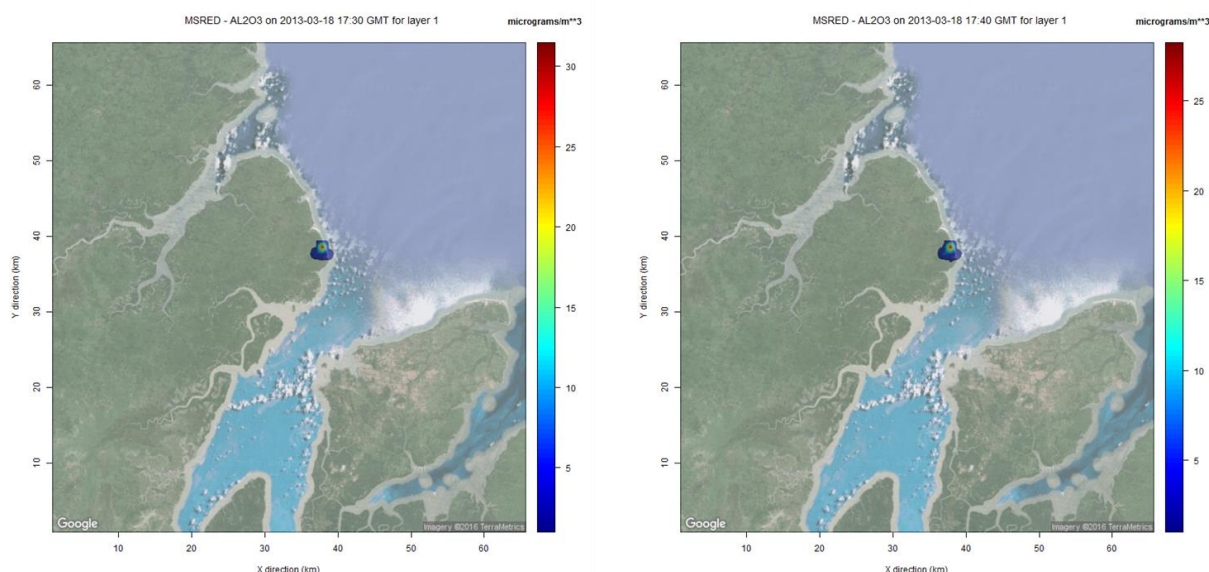


Figura 14. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 18/03.

No dia 18/03, conforme Figuras 13 a 15, a direção do vento foi de norte – nordeste, e sua velocidade foi em média 7 m/s. para este período a dispersão do material poluente não foi muita acentuada, apesar da velocidade do vento. A pluma ficou concentrada próxima a base de lançamento.

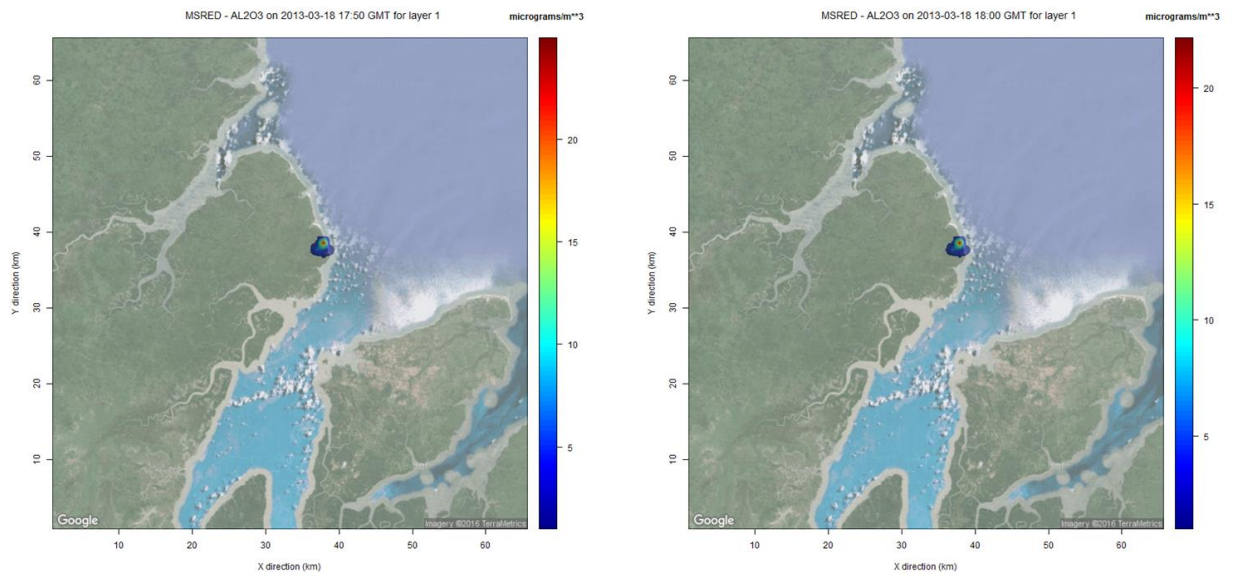


Figura 15. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 18/03.

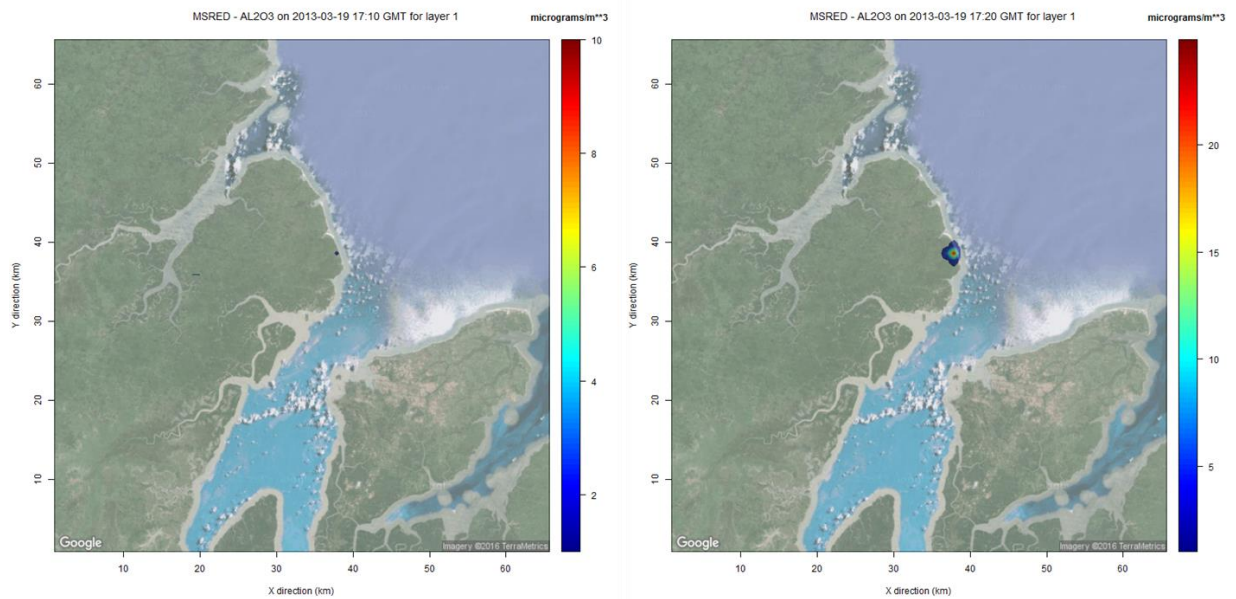


Figura 16. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 19/03.

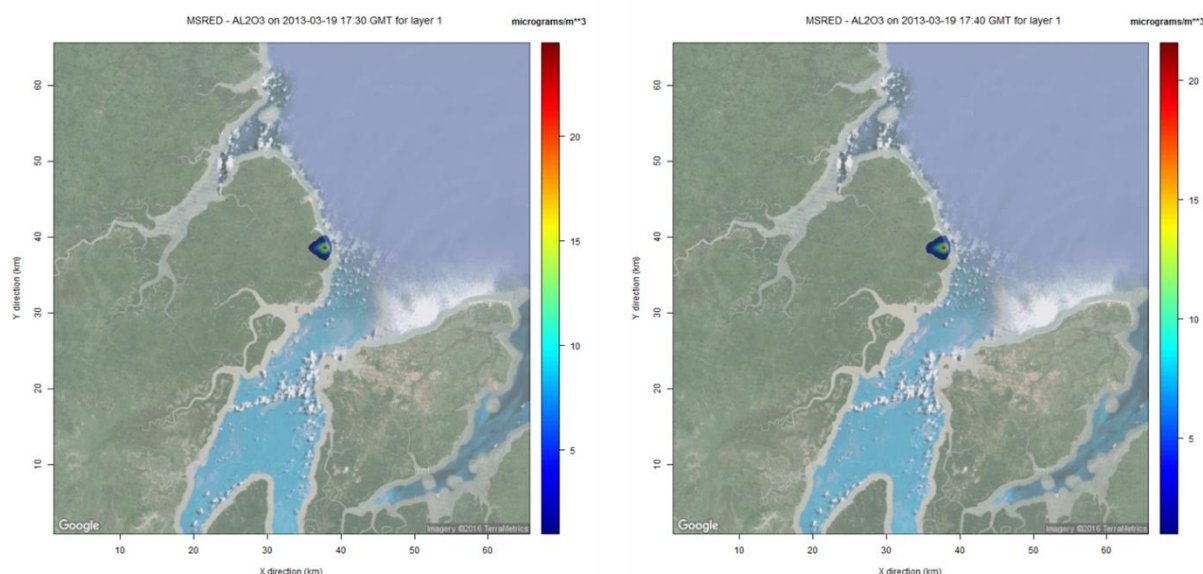


Figura 17. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 19/03.

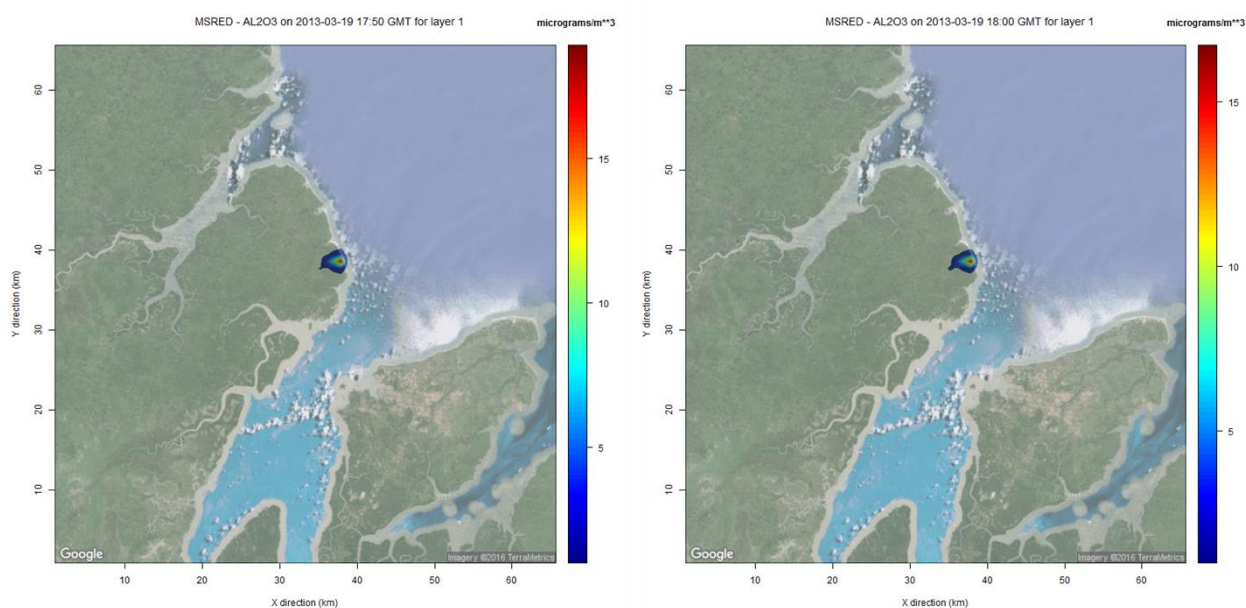


Figura 18. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 19/03.

Para as Figuras 16 a 18, referentes ao dia 19/03, ocorre dispersão considerável do poluente alumina entre os intervalos de tempo de 10 minutos. Neste período a direção predominante foi nordeste, com velocidade do vento média de 7 m/s. A direção do vento justifica o espalhamento da pluma em direção ao continente, e sua velocidade está diretamente ligado ao aumento do raio de espalhamento desta pluma.

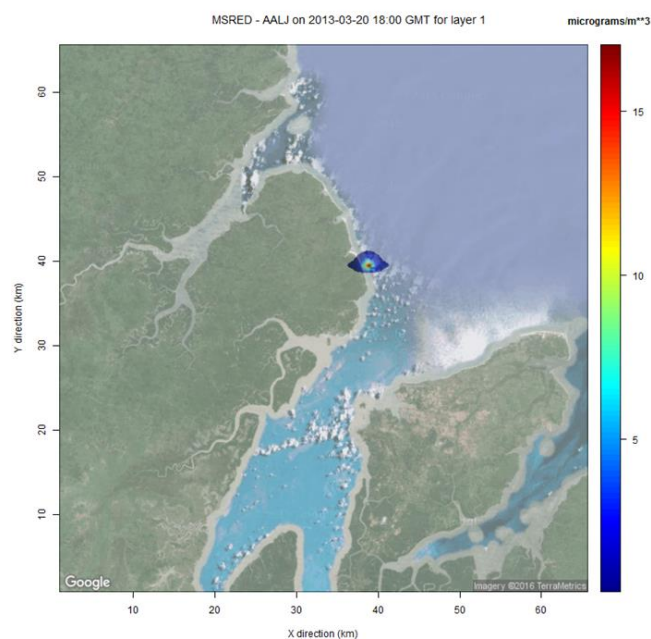


Figura 19. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 20/03.

Para o dia 20/03, Figura 19, houve maior raio de espalhamento da pluma, e sua direção foi avante ao litoral. A direção predominante do vento para este período foi leste – sudeste, e a velocidade média do vento foi relativamente baixa, em torno de 5 m/s. A direção do vento explica a tendência do espalhamento da pluma em direção ao oceano. E o aumento do raio de dispersão dessa pluma pode ser interpretado pela presença das falésias próximas ao litoral, ocasionado uma queda abrupta no terreno, e por consequência aumento a turbulência naquela região.

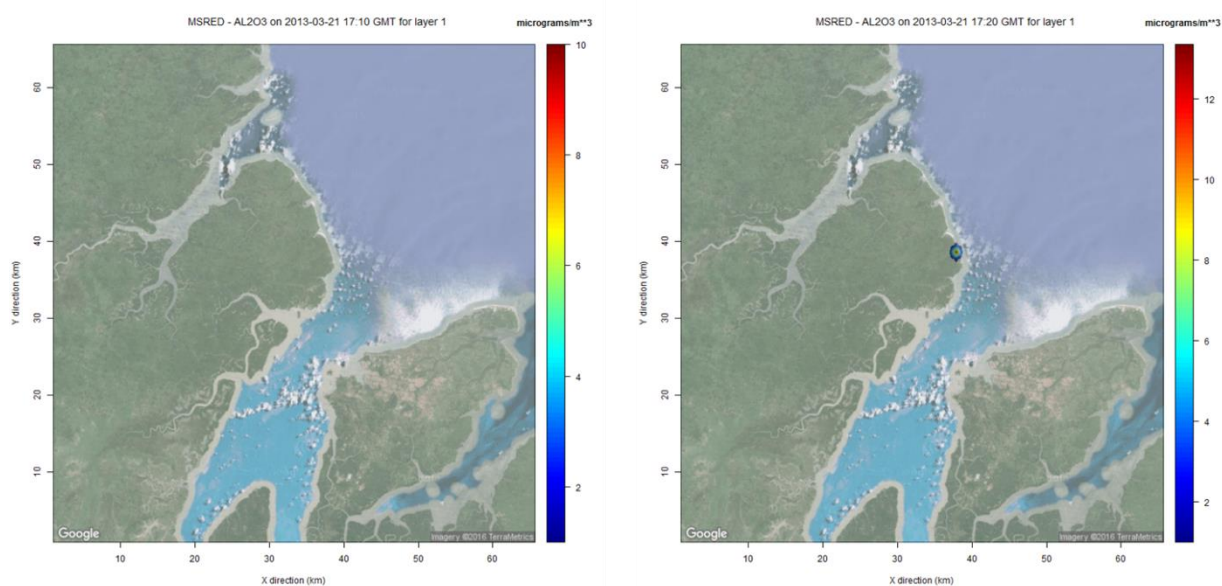


Figura 20. Cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 21/03.

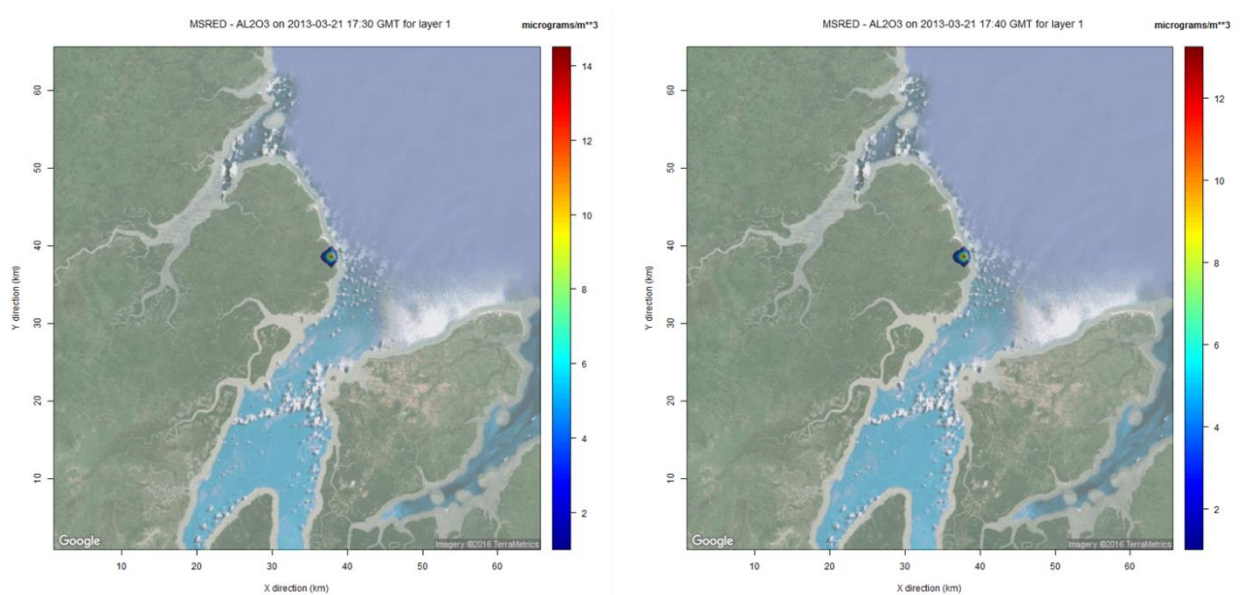


Figura 21. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 21/03.

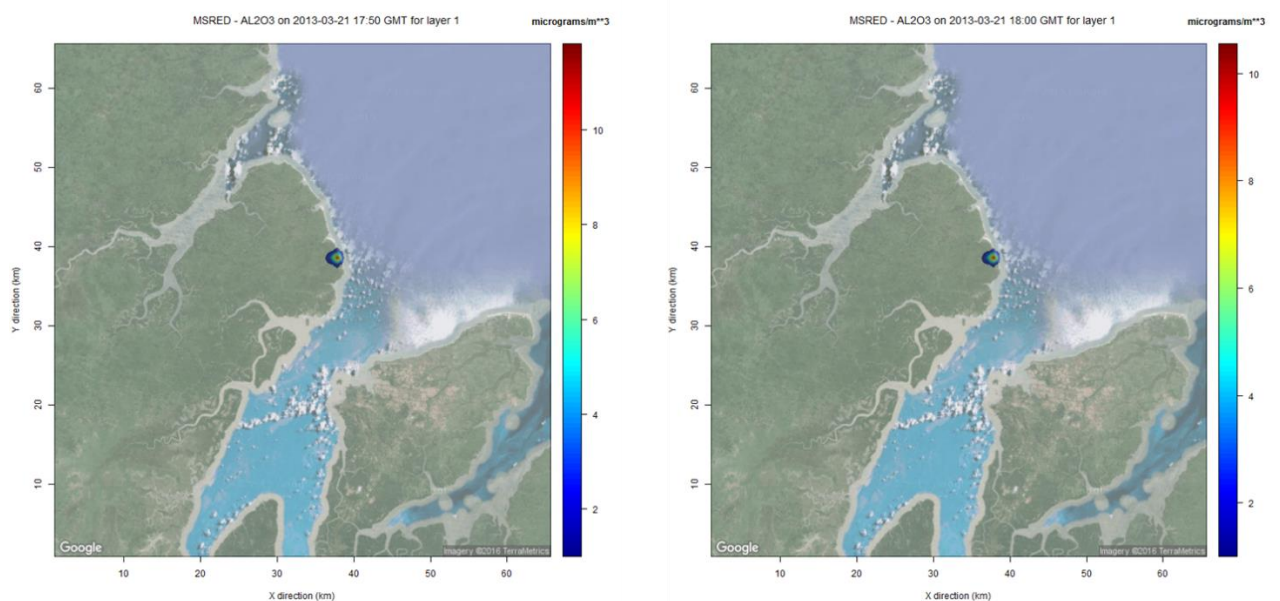


Figura 22. Continuação do cenário de concentração com intervalo de 10 minutos para o poluente óxido de alumínio, para o dia 21/03.

Nas Figuras 20 a 22, a pluma de concentração da alumina para o dia 21/03 é apresentada. E pode-se observar que o raio de dispersão é pequeno quando comparado ao dia 20/03. Para este período a direção do vento foi de leste-nordeste, e a velocidade do vento ficou em torno de 5 m/s.

Após observação das plumas de dispersão para os dias 18 a 21/03, é notório que a velocidade do vento tende a influenciar a raio de dispersão da pluma de poluentes, quanto

maior for a velocidade do vento, maior poderá ser a raio de dispersão. E que a direção do vento está relacionada com o posicionamento dessa pluma, direções norte – nordeste podem posicionar a pluma em direção ao continente e conseqüentemente as proximidades das cidades, e as direções leste – sudeste, tendem a arrastar essa pluma sentido oceano. É importante salientar, que outros parâmetros devem ser levados em consideração para dimensionar a dispersão dos poluentes.

6 CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi simular a dispersão de gases liberados por veículos espaciais no Centro de Lançamento de Alcântara, a fim de legitimar o acoplamento do modelo de modelagem meteorológica, realizada com o modelo WRF no modo LES para casos reais, e de seu acoplamento com o modelo MSDEF, para a modelagem de curto alcance da dispersão da nuvem de exaustão.

Para obtenção do objetivo geral, foi realizada a simulação meteorológica, através do modelo atmosférico WRF. Os dados gerados a partir do WRF foram analisados e validados por intermédio de índices estatísticos e de benchmark, e em seguida comparados aos valores coletados por instrumentos de radiossondagem presentes na região de lançamentos de Alcântara. As análises realizadas mostraram um bom desempenho do modelo de mesoescala WRF para todos os parâmetros em questão.

Após as análises meteorológicas, esses parâmetros foram então utilizados como dados de entrada para o modelo simulador de efluentes de foguetes, MSDEF, que apresentou como dados de saída, a dispersão do material particulado alumina.

A modelagem de curto alcance mostrou que a nuvem não teria impactado regiões habitadas na primeira hora após o lançamento, pois sua maior concentração se localiza próxima a base de lançamento. Contudo as condições meteorológicas se mostraram fundamentais para promover ou não o espalhamento dos poluentes gerados.

Levando em consideração os resultados apresentados, e tendo em vista a metodologia de trabalho proposta e desenvolvida, pode-se afirmar que o objetivo principal e os objetivos específicos deste trabalho foram alcançados com sucesso, mostrando que é possível utilizar o modelo meteorológico de mesoescala, WRF para gerar dados de entrada ao MSDEF. É importante ressaltar que este sistema de modelagem pode ser aplicado a qualquer caso de lançamento de foguete em qualquer local do mundo, para simulações e análises pré e pós-lançamento dos efeitos ambientais de operações de lançamento de foguetes.

Daí, conclui-se com propriedade que a aplicação e utilização integrada do modelo WRF para a geração de cenários meteorológicos passados e futuros (previsão), do modelo MSDEF para a simulação da formação e da dispersão de curto alcance da nuvem de exaustão de foguetes, em diferentes cenários de meteorologia e de lançamentos, é fundamental e adequada para sua utilização operacional pelo CLA na avaliação e simulação do impacto ambiental de diferentes cenários pré e pós-lançamentos, bem como na determinação de locais de monitoramento no entorno do centro.

7 REFERÊNCIAS

AEB. Agência Espacial Brasileira. PNAE – Programa Nacional de Atividades Espaciais 2012-2021, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em <http://www.aeb.gov.br/wp-content/uploads/2013/01/PNAE-Portugues.pdf>, 2013. Acessado em 01/09/2016.

ALVES, C. Aerossóis Atmosféricos: Perspectiva Histórica, Fonte, Processos Químicos de Formação e Composição Química. Química Nova 28 (2005): 859-870. ALVES, R. **Avaliação da qualidade do ar em escolas fundamentais da cidade de Colombo através de material particulado em suspensão e sua relação com a indústria de local cal.** Dissertação Mestrado. Gestão Ambiental, Universidade Positivo. Curitiba, 2009.

ARYA, S. P. **Air pollution meteorology and dispersion.** New York, Oxford University Press, 1999.

AVIGO JR., D. **Qualidade do ar em escolas de Curitiba.** Dissertação de Mestrado. Gestão Ambiental, Universidade Positivo. Curitiba, 2008.

BARDINA, J., THIRUMALAINAMBI, R. **Web-based toxic gas dispersion model for Shuttle launch operations.** NASA Ames Research Center, Mail Stop 269-2, Moffett Field, California, USA.

BIANCONI, R. e TAMPONI, M. **A mathematical model of diffusion from a steady source of short duration in a finite mixing layer.** Atmos. Environ. 27A, 5, 781-792, 1993.

BJORKLUND, J. R.; DUMBAULD, J.K.; CHENEY, C.S.; GEARY, H.V. **User's manual for the REEDM (Rocket Exhaust Effluent Diffusion Model) compute program.** NASA contractor report 3646. NASA George C. Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, 1982.

BJORKLUND, J. R. **User instructions for the Real- Time Volume Source Dispersion Model (RTVSM).** H.E Cramer Company, Inc. Report TR-90-374-02, prepared for U.S. Army Dugway Proving Ground, Dugway, UT, 1990.

BJORKLUND, J. R.; BOWERS, J. F.; DODD, G. C.; WHITE, J. M. **Open Burn/Open Detonation Dispersion Model (OBODM) users' guide.** V. 2, Technical description. West desert test center, US Army Dugway proving ground, Dugway, Utah, 1998.

BLACKADAR, A. K. **Turbulence and diffusion in the atmosphere: lectures in Environmental Sciences.** Springer-Verlag, 185pp, 1997.

BERNARDES, M. **Conceitos De Estabilidade Atmosférica E Dispersão Atmosférica.** Ppgmne - Ufpr / Lemma, 2008.

BIANCONI, R. e TAMPONI, M. **A mathematical model of diffusion from a steady source of short duration in a finite mixing layer.** Atmos. Environ. 27A, 5, 781-792, 1993.

CCOHS. Canadian Center for Occupational Health and Safety. Novembro de 2012. Disponível em www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/how_do.html. Acessado em 01/10/2016.

CHANG, J.C., HANNA, S.R. **Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package, Version 2.0.** Fairfax, 2005.

CHANDRASEKAR, A., PHILBRICK, C. R., CLARK, R. DODDRIDGE, B., GEORGOPLULOS, P. **Evaluating the performance of a computationally efficient MM5/CALMET system for developing wind field inputs to air quality models.** Atmospheric Environment. V. 37, p. 3267-3276, 2003.

CHENG, F-Y.; BYUN, D. W. **Application of high resolution land use and land cover data for atmospheric modeling in the Houston-Galveston metropolitan area, Part I: Meteorological simulation results.** Atmospheric Environment, v. 42, p. 7795-7811, 2008.

COLLS, J. **Air Pollution.** Nottingham: Taylor & Francis, 560pp, 2002.

CORRÊA, E. B.; CATALDI, M.; PIMENTEL, L. C. G. **Análise Comparativa das Simulações do Modelo de Mesoescala MM5 e Dados Meteorológicos Observados para a Região do Galeão/RJ.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v. 29 – 2, p. 66-86, issn 0101-9759, 2006.

COSTA, C.P.; VILHENA, M.T.; MOREIRA, D.M.; TIRABASSI, T. **Semi-analytical solution of the steady three-dimensional advection-diffusion equation in the PBL.** Atmospheric Environment 40, 5659-5669, 2006.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Controle da Poluição do Ar.** Resolução nº3, 28/06/1990. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em 18/02/2015.

DEGRAZIA, G.A.; ANFOSSI, D.; CARVALHO, J.C.; MANGIA, C.; TIRABASSI, T.; CAMPOS VELHO, H.F. **Turbulence parameterisation for PBL dispersion models in all stability conditions.** Atmospheric Environment 34, 3575–3583, 2000.

DENISON, M. R.; LAMB, J. J.; BJORND AHL, E. Y.; LOHN, P. D. **Solid Rocket Exhaust in the Stratosphere: Plume Diffusion and Chemical Reactions.** Em: Journal of Spacecraft and Rockets 31 (3), S. 435–442, 1994.

EMERY, C. TAI, E., YARWOOD, G. **Enhanced Meteorological Modeling and Performance Evaluation for Two Texas Ozone Episodes.** Work Assignment No. 31984-11. TNRCC Umbrella Contract No. 582-0-31984.

FERREIRA, P. et. al. **Alumínio como fator de risco para a doença de alzheimer.** Ribeirão Preto: [s.n.], 2008.

FISCH, G. **Características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLP).** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 14, p.11-21, 1999.

GARRATT, R. J. **The atmospheric boundary layer.** Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 1994.

GILLIAN, C. R.; HOGREFE, C.; RAO, S.T. New methods for evaluating meteorological models used in air quality applications. **Atmospheric Environment**, v.40, p. 5073-5086, 2006.

GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. **A description of the fifth Generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5)**. 1994.

GODISH, T. **Air quality**. 3rd ed. New York: Lewis Publishers, 1997.

HANNA, S., R., PAINE, R., J. **Hybrid Plume dispersion Model (HPDM) Development and Evaluation**. **Journal of applied Meteorology**. V. 28, p. 206-224. 1988.

HUMBLE, R. W., HENRY, G. N., LARSON, W. J. **Space Propulsion Analysis And Design**. MacGraw-Hill Companies, Inc. Primis Custom Publishing, 1995.

JACOBSON, M. **Atmospheric Pollution**. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.

KESARKAR, A. P., DALVI, M., KAGINALKAR, A., O. Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM10 dispersion over Pune, India. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 1976-1988, 2007.

LEMES, M.A.M.; MOURA, A. D. **Fundamentos de dinâmica aplicados à meteorologia e oceanografia**. São José dos Campos, SP, INPE/UNIVAP, 1998.

MAGNAGO, R.; FISCH, G.; MORAES, O. Análise espectral do vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p.260-269, 2010.

MOHAN, M.; SIDDIQUI, T.A. Applied Modeling of Surface Fluxes under Different Stability Regimes. **American Meteorological Society**, 37, 1055 – 1067. 1998.

MOREIRA, D. M.; DEGRAZIA, G. A.; VILHENA, M. T. **Dispersion from low sources in a convective boundary layer: an analytical model**. *Il Nuovo Cimento*, Vol. 22C, n.5, pp. 685- 691, 1999.

MOREIRA, D. M.; SANTOS, D. P.; CARVALHO, J. C.; VILHENA, M. T.; DEGRAZIA, G. A.; TIRABASSI, T. **Solution of the steady K-diffusion equation for ABL dispersion in inhomogeneous turbulence with plume rise**. *Brazilian Journal of Meteorology* 19, 2, 113-122, 2004.

MOREIRA, D. M.; RIZZA, U.; VILHENA, M. T.; GOULART, A. G. **Semi-analytical model for pollution dispersion in the planetary boundary layer**. *Atmospheric Environment*, v. 39, No. 14, pp. 2689-2697, 2005a.

MOREIRA, D. M.; CARVALHO, J. C.; GOULART, A. G.; TIRABASSI, T. **Simulation of the dispersion of pollutants using two approaches for the case of a low source in the SBL: evaluation of turbulence parameterisations**. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 161, 285-297, 2005b.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; CARVALHO, J. C. **Plume dispersion simulation in low wind conditions in stable and convective boundary layers**. Atmospheric Environment, v. 39, No. 20, 3643-3650, 2005d.

MOREIRA, D. M.; VILHENA, M. T.; TIRABASSI, T.; COSTA, C.; BODMANN, B. **Simulation of pollutant dispersion in the atmosphere by the Laplace transform: the ADMM approach**. Water, Air and Soil Pollution, v. 177, 411-439, 2006.

MOREIRA, M. D., VILHENA, M. **Air Pollution and Turbulence: Modeling and Applications**. CRC Press, 2009.

MOREIRA, D.M.; TRINDADE, L. **Manual do Usuário do Modelo MSDEF (Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes). Versão 1.0/2010**, Relatório Técnico, CTA/IAE/ACA. 70pp. 2010.

MOREIRA, M. D.; TRINDADE, L.B.; FISCH, G.; MORAES, M.R.; DORADO, R.M.; GUEDES, R.L. **A multilayer model to simulate rocket exhaust clouds**. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 3, 41-52, 2011.

NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M.; FISCH, G.; ALBUQUERQUE, T. T. A. **A numerical study of the contaminants dispersion in Alcantara Launch Center**. Em: Proceedings of the 1st Bi-Annual CMAS South America Conference, São Paulo, SP, Brazil, 2013a. Disponível em http://www.lapat.iag.usp.br/aerossol/CMAS/abstracts/Erick_CMAS-abstract.pdf. Acessado em 01/09/2016.

NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M.; FISCH, G.; ALBUQUERQUE, T. T. A. **Modeling the Impact of Emissions of HCL During Rocket Launch Events in the Region of Alcantara Launch Center**. Em: Proceedings of the 12th Annual CMAS International Conference, Chapel Hill, NC, EUA, 2013b. Disponível em <https://www.cmascenter.org/conference/2013/agenda.cfm>. Acessado em 01/09/2016.

NASCIMENTO, G. S.E., MOREIRA, M. D., FISCH, G. e ALBURQUERQUE, A. T. T. **Simulation of Rocket Exhaust Clouds at the Centro de Lançamento de Alcântara Using the WRF-CMAQ Modeling System**. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.6, No 2, pp.119-128, Apr.-Jun., 2014.

NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; REIS, N. C. Jr.; SANTOS, J. M.; GOULART, E. V.; FISCH, G. **Atmospheric dispersion modeling to simulate rocket exhaust clouds**. Em: Proceedings of the 17th International Conference on Computational Methods and Experimental Measurements, WIT Transactions on Modelling and Simulation, vol. 59. ISSN:1746-4064, 2015a.

NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M.; FISCH, G.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; ROSA, L. C.; PEDRUZZI, R. **Evaluating the Impact of Large Eddy Simulations in Rocket Exhaust Modeling**. Em: XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro. v. 36. DOI: 10.20906/CPS/CILAMCE2015-0438, 2015b.

NEMMAR, A., HOET, P.H.M., VANQUICKENBORNE, B., DINSDALE, D., THOMEER, M., HOYLAERTS, M. F., VANBILLOEN, H., MORTELMANS, L., NEMERY, B. **Passage of**

inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation* 105, n. (4) (2002): 411-4.

PILCER, G., AMIGHI, K. **Formulation Strategy and Use of Excipients in Pulmonary Drug Delivery.** *International Journal of Pharmaceutics*, 2010.

POLYAEV, V.M., BURKALTSEV, V.A. **Liquid propellant rocket engines.** Thermal to mechanical energy conversion: Engines and requirements – Vol.II, Department of rocket engines, Bauman Moscow State Technical university, Russia, 2002.

SALVADOR, N. **Estudo da camada limite atmosférica em regiões metropolitanas costeiras com simulações de brisa marítima.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2014.

SANTIAGO, A. M. **Simulação da camada limite planetária sobre a região metropolitana da grande vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF.** Vitória. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

SEAMAN, N. L. **Meteorological modeling for air-quality assessments.** *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 2231-2259, 2000.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** 2nd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

SILVA, A. F. G; FISH, G. **Avaliação do modelo WRF para a previsão do perfil do vento no centro de lançamento de Alcântara.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.2, 259 – 270, 2014.

SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., **A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications.** *Journal of Computational Physics*, vol 227, p. 3465 -3485, 2008.

SOARES DA SILVA, M. **Estratégias de Simulação da Dispersão de Poluentes com os Modelos WRF/CALMET/CALPUFF para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Mecânica. UFRJ; COPPE. Rio de Janeiro, 2012.

SRINIVAS, C. V.; VENKATESAN, R.; SINGH, B. A. **Sensitivity of mesoscale simulations of lan-sea breeze to boundary layer turbulence parametrization.** *Atmospheric Environment*, v. 41, p. 2534-2548, nov-2006.

STRANGER, M. **Characterisation of Health Related Particulate and Gasphase Compounds in Multiple Indoor And Outdoor Sites in Flanders.** Tese de Doutorado, Universiteit Antwerpen. 2005.

STRANGER, M., POTGIETER-VERMAAK, S. S., VAN GRIEKEN, R. **Characterization of Indoor Air Quality in Primary Schools in Antwerp, Belgium.** *Indoor Air* 18: 454-463, 2008.

STRAWBRIDGE, K. B.; SNYDER, B. J. **Planetary boundary layer height determination during Pacific 2001 using the advantage of a scanning lidar instrument.** Atmospheric Environment. v. 38, p. 5861-5871, 2004.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.** Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 670pp, 1988.

SUTTON, G. P., Biblarz, O. **Rocket propulsion elements: an introduction to the engineering of rockets**, 7ed. 2001.

TENNEKES, H. & LUMLEY, J. L. **A First Course in Turbulence.** Cambridge, Massachusetss, England, The MIT Press, 1972.

USEPA. **Aermod: Description of Model Formulation.** Carolina do Norte, 2004. Disponível em < https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf > Acesso em: 20/11/2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **The world health report 2006: working together for health**, 2006.